ÜBER DEN EINFLUSS ALLSEITIGEN HYDROSTATISCHEN DRUCKES AUF DIE ELEKTRISCHE LEITFÄHIGKEIT VON WISMUTDRÄHTEN AUSSERHALB UND INNERHALB DES TRANSVERSALEN MAGNETFELDES FÜR GLEICHSTROM UND FÜR WECHSELSTROM

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT, SEKT. II

DER

KGL. LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

VORGELEGT AM 29. JANUAR 1914

VON

JOHANNES BRENTANO

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

LEIPZIG
JOHANN AMBROSIUS BARTH
1914

Tag der mündlichen Prüfung: 6. März 1914

Dekan: Herr Prof. Dr. Sommerfeld
Referent: Herr Prof. Dr. Röntgen

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

MEINEM LIEBEN VATER

UND DEM ANDENKEN

MEINER UNVERGESSLICH TEUEREN MUTTER

IN INNIGER DANKBARKEIT.

Inhalt.

Seite

Stellung der Aufgabe 7

I. Widerstandsänderung im transversalen Magnetfeld 8

1. Einleitung 8
2. Versuchsanordnung 9
3. Ausführung der Beobachtungen 20
4. Kritik der Fehlerquellen 28
5. Ergebnisse der Messungen 30
6. Nachwirkungserscheinungen 42

II. Wechselstrom-Gleichstromeffekt 46

7. Überblick und Versuchsanordnung 46
8. Ausführung der Beobachtungen 50
9. Erreichte Genauigkeit und Fehlerquellen 51
10. Ergebnisse der Messungen 54
11. Beziehung der Ergebnisse zu anderweitigen Untersuchungen . 69

III. Zusammenfassung der experimentellen Resultate 74

Stellung der Aufgabe.

Bei der Erklärung einiger Eigentümlichkeiten der Leitung des elektrischen Stromes, die in besonderem Maße an Wismut beobachtet werden, ist es noch ungewiß, welche Rolle man dem besonderen molekularen Aufbau und welche man der Struktur im Sinne einer gröberen kristallinischen Schichtung zu geben hat.

In dieser Hinsicht scheint es von Interesse zu untersuchen, wie sich der Einfluß allseitigen Druckes auf die erwähnten Vorgänge äußert, weil zu erwarten steht, daß, falls die Schichtung einen wesentlichen Anteil hat, dies sich bei allseitiger Kompression äußern wird, da wohl verschiedene Elastizitätskoeffizienten, also Unterschiede der Zusammendrückbarkeit für die verschiedenen Schichten anzunehmen sind. Im besonderen schien dies gerechtfertigt, da in einigen neueren Arbeiten[1]) der Versuch gemacht wird, die bei Wismut im transversalen Magnetfeld beobachtete Widerstandserhöhung und die als Wechselstrom-Gleichstromeffekt bezeichnete Erscheinungsgruppe auf schlecht leitende Zwischenschichten im Inneren des Wismuts zurückzuführen, die nach Seidler als ionisierbare Gasschichten zu denken wären.

Zweck der vorliegenden Arbeit war es zunächst, den Einfluß allseitigen Druckes auf die Widerstandserhöhung im Magnetfeld für Gleichstrom und auf den Unterschied zwischen Gleichstrom- und Wechselstromwiderstand zu untersuchen.

---

1) R. Seidler, Dissertation, Leipzig 1909; J. Geipel, Dissertation, Leipzig 1911.

I. Widerstandsänderung im transversalen Magnetfeld.

1. Einleitung.

Die Widerstandsänderung von Wismut im Magnetfeld ist von Leduc, Ettinghausen und Nernst, van Everdingen und anderen eingehend untersucht worden.[1]) Sie wird meist in der Form $\frac{w_f - w_0}{w_0}$ angegeben, wobei w_f der Widerstand im Feld, w_0 der Widerstand des betreffenden Drahtes außerhalb des Feldes ist, und wurde als longitudinaler Halleffekt bezeichnet, der wohl zu unterscheiden ist von der durch das Zustandekommen des transversalen Halleffekts bedingten, von Boltzmann auf energetischem Wege abgeleiteten Widerstandsänderung. Die Größe $\frac{w_f - w_0}{w_0}$ hängt in komplizierter Weise von der Feldstärke und der Temperatur ab; angenähert nimmt sie quadratisch mit der Feldstärke zu, höhere Temperaturen führen zu einer Abnahme, tiefere zu einer stärkeren Zunahme. Für die von der Firma Hartmann & Braun zur Feldmessung hergestellten Wismutspiralen wird in einem engen Temperaturbereich von höchstens $\pm 10^0$ die Temperaturabhängigkeit in der Form

$$\frac{w_f - w_0}{w_0} \cdot (1 - 0{,}014\, t)$$

wo t von der Eichtemperatur zu rechnen ist, angegeben. Henderson[2]), welcher die Temperaturabhängigkeit zwischen 0^0 und 100^0 eingehend untersucht hat, zeigt, daß sie sich übersichtlicher darstellt, wenn man nicht die Temperaturabhängigkeit der Größe $\frac{w_f - w_0}{w_0}$, sondern den Temperaturkoeffizienten des Widerstandes für verschiedene Feldstärken ins Auge faßt. Er findet so mit zunehmender Feldstärke eine Abnahme des normalen, außerhalb des Feldes beobachteten Temperaturkoeffizienten, der bei einer bestimmten Feldstärke verschwindet und in stärkeren Feldern mit umgekehrtem Vorzeichen, d. h. im Sinne einer Widerstandsabnahme bei Temperaturerhöhung wächst.

---

1) Vgl. z. B. das Referat von Zahn in Jahrbuch d. Radioakt. 5. 1908.
2) Henderson, Ann. d. Phys. 53. p. 912. 1894.

Der Einfluß allseitigen Druckes auf den Widerstand des Wismuts außerhalb des Feldes ist von Williams[1]) gemessen worden. Im Gegensatz zu den meisten anderen reinen Metallen wird der Widerstand des Wismuts durch Druck vergrößert und zwar beträgt die Widerstandszunahme nach Williams $19{,}6 \cdot 10^{-6}$ pro Atm.

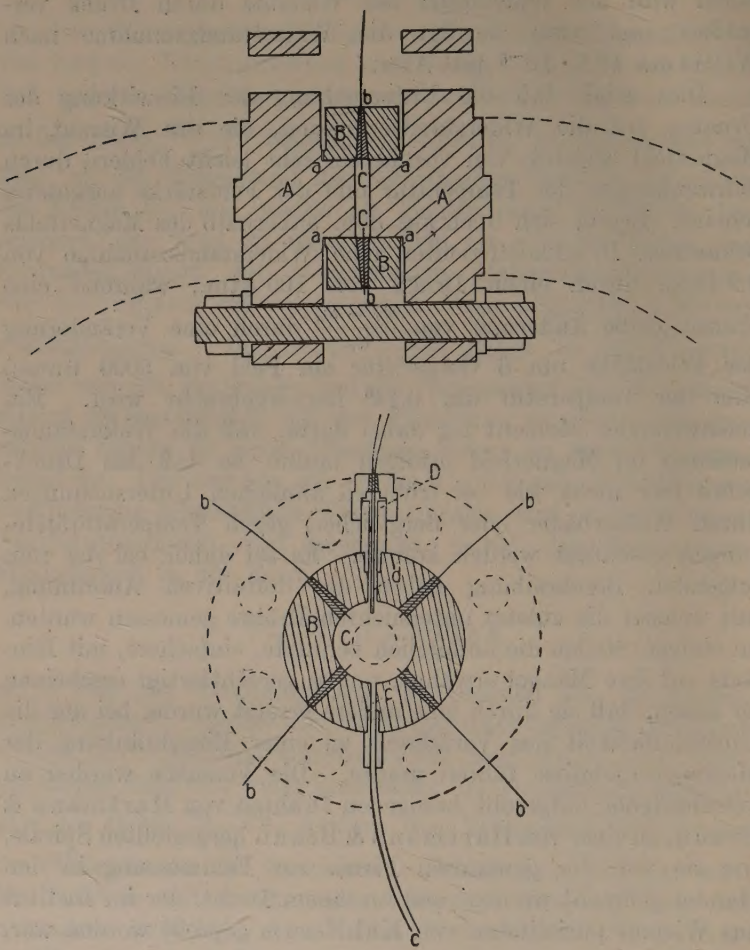
Dies zeigt daß die Untersuchung der Einwirkung des Druckes auf die Widerstandserhöhung, die das Wismut im Magnetfeld erleidet, von vornherein sehr leicht Fehlern durch Schwankungen der Temperatur und der Feldstärke ausgesetzt scheint. Ergibt sich doch aus dem außerhalb des Magnetfelds bekannten Druckkoeffizienten eine Widerstandszunahme von 0,2 Proz. durch einen Druck von 100 Atm., während eine ebenso große Änderung von $\frac{w_f - w_0}{w_0}$ durch eine Veränderung der Feldstärke um 6 Gauss (für ein Feld von 5000 Gauss) oder der Temperatur um $0{,}14^0$ hervorgebracht wird. Ein erschwerendes Moment lag dabei darin, daß die Widerstandsmessung im Magnetfeld erfolgen mußte, so daß das Druckgefäß hier nicht wie bei früheren ähnlichen Untersuchungen durch Wasserbäder oder dergleichen gegen Temperaturänderungen geschützt werden konnte. Es sei daher bei der nun folgenden Beschreibung neben der definitiven Anordnung, mit welcher die zuletzt untersuchten Drähte gemessen wurden, an einigen Stellen die anfänglich benutzte, einfachere, mit Hinweis auf ihre Mängel erwähnt, um es gerechtfertigt erscheinen zu lassen, daß sie durch eine andere ersetzt wurde, bei der die Umständlichkeit des Verfahrens zu einer Einschränkung der Messungsergebnisse führen mußte. Die Versuche wurden an verschiedenen aufgerollt bezogenen Drähten von Hartmann & Braun, an einer von Hartmann & Braun hergestellten Spirale, wie sie von der genannten Firma zur Feldmessung in den Handel gebracht werden, und an einem Draht, der im Institut aus Wismut purissimum von Kahlbaum gepreßt worden war, gemacht.

2. Versuchsanordnung.

Den wesentlichen Teil der Versuchsanordnung bildete das Druckgefäß, welches so beschaffen sein mußte, daß sich in ihm ein Magnetfeld von genügender Stärke herstellen ließ.

1) Williams, Phil. Mag. (6) 13. p. 635. 1907.

Ein solches Gefäß konnte aus weichem Schmiedeeisen und unmagnetischem Nickelstahl, den die Firma Krupp dem Institut zur Verfügung stellte, gebaut werden. Wie die bei-



(ca. $^1/_4$ natürl. Größe.)
Fig. 1.

stehende Skizze (Fig. 1), welche zwei Schnitte des Druckgefäßes zeigt, erkennen läßt, besteht dasselbe aus zwei zylindrischen Stücken *A* aus weichem Eisen und einem Ring *B* aus unmagnetischem Nickelstahl, die mit Zwischenschaltung

von Dichtungsringen aus Kupfer mit Asbesteinlage in *a* von acht kräftigen Schrauben, ebenfalls aus unmagnetischem Nickelstahl, fest zusammengepreßt werden konnten. Die Eisenstücke grenzten so einen Hohlraum *C* ab von 0,7 cm Höhe und 4,0 cm Durchmesser, welcher den zu untersuchenden Draht aufnahm. Das Ganze ließ sich zwischen die Pole eines du Bois-Magneten bringen, wobei die Lage durch die äußeren zentralen Ansätze an *A*, die in die Durchbohrungen der Schenkel paßten, fixiert war.

Die Stromzuleitungen wurden durch den zylindrischen Ring *B* mittels dicker Kupferdrähte *b* geführt, die, schwach konisch gestaltet, in kegelförmige Hartgummistücke paßten, die ihrerseits in senkrecht zur Achse des Ringes angeordneten konischen Bohrungen steckten. Die Flächen waren mit Marineleim gedichtet und erwiesen sich, nachdem durch Anwendung eines starken Druckes eine endgültige Deformation des Hartgummis eingetreten war, als vollkommen dicht. Der Ring *B* war außerdem mit zwei Durchbohrungen versehen, an die eine *c* war ein enges Druckrohr aus Kupfer angelötet, welches zum Manometer und zur Cailletetschen Druckpumpe führte, während die andere *d* ursprünglich nur den Zweck hatte, beim Füllen des Gefäßes die zurückbleibende und in dem als Druckflüssigkeit verwendeten Paraffinöl enthaltene Luft mit der Wasserstrahlpumpe abzusaugen. Später wurde durch diese Öffnung, die mit einem Ansatzstück *D* aus Nickelstahl versehen war und mit einer Überfangmutter verschlossen werden konnte, ein Thermoelement eingeführt. Dieses, teils durch die Maschinenfabrik Maffei, teils durch den Institutsmechaniker exakt gearbeitete Druckgefäß bewährte sich bei allen Versuchen sehr gut. Die Permeabilität des Nickelstahls erwies sich so klein, daß trotz der einer Konzentration der Kraftlinien nicht sehr günstigen Gestalt der Seitenteile *A*, im Interferrikum in *C* bei einem Magnetisierungsstrom von 4,9 Amp. eine Feldstärke von 9000 Gauss erzielt werden konnte. Die Parallelität der Seitenflächen von *C* war dadurch gegeben, daß beim jedesmaligen Zusammensetzen darauf geachtet wurde, daß der Abstand der Teile *A*, auf dem äußeren Umfang gemessen, überall gleich sei.

Um einen Einblick in die Änderung des Feldes in radialer Richtung zu gewinnen, wurde der Ring *B* durch einige Messing-

röhren ersetzt, welche auf die einzelnen Schraubenbolzen gestreift waren und die Teile *A* in gehörigem Abstand hielten. Es konnten so sichelförmig gekrümmte Induktionsspiralen von der in der nebenstehenden Zeichnung (Fig. 2) veranschaulichten Gestalt in *C* eingeführt werden.

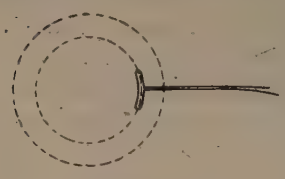


Fig. 2.

Da axiale Symmetrie vorausgesetzt werden konnte, so brachte es die besondere Form der Induktionsfläche mit sich, daß sie für einen bestimmten Abstand von der Achse des Druckgefäßes (welchem ihre Krümmung entsprach) in einem in radialer Richtung sehr wenig ausgedehnten Gebiet lag. Dementsprechend konnte mit Benutzung mehrerer verschieden gekrümmter Spiralen, die in einem homogenen Feld geeicht und so untereinander vergleichbar waren, durch Messung der ballistischen Ausschläge eines Galvanometers, wenn sie aus einer wohlbestimmten Lage im Feld plötzlich entfernt wurden, eine ziemlich genaue Ausmessung des Feldes vorgenommen werden.

Das Ergebnis war, daß, wenn die Durchbohrungen der Schenkel des du Bois-Magneten mit den dazugehörigen Einsatzstücken aus weichem Eisen ausgefüllt waren, das Feld im Inneren als homogen angesehen werden konnte, und erst in den letzten 3 mm von der äußeren Kante ein starker Abfall der Feldstärke eintrat. Waren hingegen die Füllstücke nicht eingesetzt, so machte sich dies durch eine kleine Abnahme der Feldstärke in der Mitte bemerkbar.

Für die Messung des elektrischen Widerstandes der Wismutdrähte wurde die Methode der Wheatstoneschen Brücke gewählt. Als Stromquelle dienten einige Akkumulatoren. Die Stromstärke war so bemessen, daß sie im Wismutdraht stets unter 1 Milliamp. blieb. Als Galvanometer im Brückenzweig diente ein Panzergalvanometer nach du Bois-Rubens von Siemens & Halske mit der Empfindlichkeit $1 \cdot 10^{-9}$. Trotz mancher Übelstände schien es geboten, dieses empfindliche Instrument zu wählen, weil, wie hier vorweggenommen werden soll, der zu messende Effekt von der Größenordnung $1 \cdot 10^{-4}$ des Widerstandes betrug und die Empfindlichkeit durch die Erhöhung der Stromstärke nicht vergrößert werden konnte,

wegen des großen spezifischen Widerstandes des Wismuts und der Gefahr einer stärkeren Erwärmung des Drahtes. Der Magnet übte keinen störenden Einfluß auf das Galvanometer aus; er war in etwa 7 m Entfernung so aufgestellt, daß das Galvanometer sich in der Achse des Streuungsfeldes befand, und so betrug die Ablenkung bei starker Magnetisierung nur etwa 1,2 Skalenteile, die leicht berücksichtigt werden konnte, während eine Änderung der Empfindlichkeit nicht zu bemerken war. Hingegen wurde das Galvanometer in unregelmäßiger und störender Weise durch vagabundierende Ströme, besonders der in der Nähe des Instituts vorbeiführenden Straßenbahn, beeinflußt, so daß die Beobachtungen nur nachts, in der Zeit, in welcher der Straßenbahnbetrieb ruhte, gemacht werden konnten. Durch die relativ hohe Empfindlichkeit, bei geringer Stromstärke und kleinem Widerstand der Anordnung, waren auch Störungen durch Thermokräfte besonders fühlbar.

Die Brücke bestand anfänglich aus einem dicken Meßdraht aus Konstantan von 1 m Länge mit Ballastwiderständen zu beiden Seiten. Sie war in einem dickwandigen Holzkasten eingeschlossen, der außen und innen mit Stanniol beklebt wurde, um Ungleichheiten der Temperatur tunlichst zu vermeiden. Der Gleitkontakt konnte von außen mit einem Schnurlauf bewegt werden: seine Stellung wurde durch eine mit einer dicken Glasscheibe versehenen Öffnung im Deckel abgelesen. In dem dritten Zweig der Brücke befand sich ein Rheostat von Edelmann. Die Empfindlichkeit der Brücke war so gewählt, daß sich die durch Druck hervorgebrachte Widerstandserhöhung des Wismutdrahtes durch Verschiebung des Brückenkontaktes gut messen ließ ohne den Rheostatenwiderstand zu ändern. Obwohl nun die Schneide des Gleitkontaktes ebenfalls aus Konstantan hergestellt war und bei späteren Versuchen die Schneide aus Kupfer, der Meßdraht aus Manganin, so konnten störende Thermoströme beim Gebrauch dieser Brücke nicht vermieden werden. Sie traten jedesmal auf, wenn der Gleitkontakt auf dem Meßdraht verschoben wurde, infolge der an der Berührungsstelle entstehenden Wärme, und verschwanden nach etwa 5 Sekunden; es wurde so die Einstellung der Brücke langwierig und unsicher. Als ein Präzisionsrheostat von Wolff, der eine Veränderung des gestöpselten Widerstandes um Beträge von 0,01 Ω zuließ, in

Benützung genommen werden konnte, wurde daher die Gleitbrücke beseitigt. An Stelle der beiden Zweige des Meßdrahtes traten zwei unveränderliche Widerstände von je 11 Ω aus Manganindraht. Die Brücke wurde durch Veränderung des Wolffrheostaten ungefähr abgeglichen und die genaue Widerstandsbestimmung durch Interpolation der Galvanometerausschläge für zwei verschiedene im Rheostaten gestöpselte Werte gemacht, ähnlich wie es bei früheren Messungen von Williams u. and. geschehen war.

Die Messungen an den Haspeln 1 bis 3 geschahen nach der ersten, die späteren nach der zweiten Methode.

Die Verbindungsdrähte zwischen den Widerständen und dem Wismutdraht bestanden aus Kupfer mit Gummiaderisolierung und hatten 2,5 mm Querschnitt, um ihren Widerstand vernachlässigen zu können und insbesondere nicht merkliche Fehler durch Veränderung dieses Widerstandes bei Temperaturänderungen des Zimmers zu erhalten. Nebeneinander herlaufende Stücke waren stets von ein und derselben Drahtrolle abgeschnitten und die Verlötungsstellen verschiedener Drähte, die nach Möglichkeit einander gegenüber angeordnet waren, wurden einzeln mit Guttapercha umwickelt und dann gemeinsam in Watte eingepackt und mit Stanniol umwickelt, um Thermokräfte tunlichst zu vermeiden. Das schon erwähnte Thermoelement, welches die Temperatur im Inneren der Druckkapsel messen sollte, bestand aus Kupfer und Konstantandraht. Es wurden diese beiden unmagnetischen Metalle gewählt, weil zu erwarten war, daß ihre gegenseitige Thermokraft durch das Magnetfeld nicht beeinflußt werde, was durch Versuche mit der für den vorliegenden Zweck nötigen Genauigkeit bestätigt werden konnte und ihre Abhängigkeit vom Druck durch die sehr genauen Messungen von Wagner[1]) bekannt war.

Die Drähte wurden durch einen Hartgummikonus, der in der entsprechend verstärkten, bei der Beschreibung des Druckgefäßes erwähnten Überfangmutter eingelassen war, in das Innere der Druckkapsel geführt, und die Lötstelle lag in der Mitte zwischen den Seitenflächen in etwa 13 mm Entfernung von der Achse. Die äußere Lötstelle befand sich in Petrol-

1) E. Wagner, Ann. d. Phys. 27. p. 955. 1908.

äther in einem Probierröhrchen. Um die Temperatur dieser Lötstelle zu fixieren, wurde das Probierrohr anfänglich in schmelzendes Eis gegeben, welches sich in einem großen Dewarschen Gefäß befand. Dabei bewährte es sich sehr gut, um die mit dem Dichtemaximum des Wassers zusammenhängenden Störungen und das lästige Rühren zu vermeiden, in die Dewarflasche einen oben offenen Zylinder aus dickwandigem Kupferblech mit siebartigem Boden zu senken, der einen Teil des Eises nach unten drückte. Durch ihn wurde erreicht, daß die Temperatur in den unteren Teilen und längs der Seitenwände des Dewargefäßes stets 0^0 betrug.

Es wurde auf diese Weise durch das Thermoelement eine Temperaturdifferenz von etwa 20^0 zwischen den beiden Lötstellen gemessen, so daß man, wenn man allzu große Ausschläge des Galvanometers vermeiden wollte, in der Empfindlichkeit nicht über 15 Skalenteile pro Grad hinausgehen konnte. Um die Genauigkeit der Temperaturmessung erhöhen zu können, wurde bei den späteren Messungen das Probierrohr in eine Thermosflasche von der üblichen Form und diese in das große Dewargefäß gegeben. Die Thermosflasche und das Dewargefäß waren dabei mit Wasser von Zimmertemperatur gefüllt, das durch einen Abschluß aus Guttapercha gegen Verdunsten geschützt war. Ein in Zehntelgrade geteiltes Thermometer, das sich neben der Lötstelle im Petroläther befand, erlaubte, die Temperatur, die nur ganz langsamen Schwankungen unterworfen war, durch Schätzen auf hundertstel Grad zu bestimmen. Da es, wie bei der Besprechung des Beobachtungsverfahren dargelegt werden soll, nicht so sehr auf die Kenntnis der Temperatur, als ihrer Änderung zwischen zwei benachbarten Versuchen mit Druck und ohne Druck ankam, zwischen denen die Temperatur der Lötstelle in der Thermosflasche als unverändert angesehen werden konnte, so war auf diesem Wege eine beträchtliche Erhöhung der Empfindlichkeit möglich. Die Temperaturdifferenz der beiden Lötstellen war bei dieser zweiten Anordnung viel kleiner (im allgemeinen weniger als 2^0), so daß von einer Berücksichtigung des Druckeinflusses auf die Thermokraft abgesehen werden konnte.

Als Galvanometer im Stromkreis der Thermoelemente wurde anfangs das Panzergalvanometer verwendet, das zur Widerstandsmessung in der Brücke diente, wobei ein Stöpsel-

umschalter aus Kupfer erlaubte, den einen oder anderen Stromkreis einzuschalten; dabei traten aber Störungen durch eine Nachwirkung der Aufhängung auf, so daß die bei der Temperaturbestimmung unvermeidlichen größeren Ausschläge die Widerstandsmessungen, bei denen kleine Ausschläge auf $^1/_{10}$ Skalenteil genau abgelesen werden mußten, beeinträchtigten. Es wurde daher bei den späteren Messungen das Thermoelement an ein Drehspulgalvanometer von Siemens & Halske angeschlossen, mit Zwischenschaltung eines Widerstandes, der gestattete die Empfindlichkeit zu verändern. Die Empfindlichkeit wurde mehrmals geprüft, indem man das Galvanometer samt Widerstand an ein Thermoelement anschloß, welches aus Drahtstücken bestand, die denselben Rollen entstammten, aus denen das im Druckgefäß eingebaute Thermoelement hergestellt war, und nun, nachdem die Empfindlichkeit durch Verändern des Widerstandes in einem genau bekannten Verhältnis verkleinert war, den Ausschlag maß, welcher einer größeren, mit Thermometern mit genügender Genauigkeit bestimmbaren Temperaturdifferenz der Lötstellen entsprach. Im Mittel betrug die Empfindlichkeit etwa 61,5 Skalenteile für 1^0 Temperaturdifferenz der Lötstellen.

Was die Erzeugung des Druckes anlangt, so wurde, wie schon erwähnt, als Druckflüssigkeit Paraffinöl verwendet. Dieses war in der zum ersten Teil der Versuche benutzten Pumpe einer Verunreinigung durch Graphitstaub ausgesetzt, indem die Hartgummiventile mit Graphit eingerieben werden mußten, um ein Festklemmen zu vermeiden. Daher wurde ab und zu seine Isolationsfähigkeit geprüft; es zeigte sich, daß sie durch den Gebrauch in der Pumpe stark abnahm, immerhin blieb sie so gut, daß die Entladung eines Elektroskops durch eine Ölschicht von etwa 1 mm Dicke eine merkliche Zeit in Anspruch nahm, so daß sie für die vorliegenden Zwecke als ausreichend gut betrachtet werden konnte.[1]) Bei der später in Benutzung genommenen Pumpe (für die Drähte 5, 6 u. 7) fiel die Verunreinigung durch Graphitstaub fort.

Der Druck wurde bei Benutzung der ersten Pumpe mit einem zu dieser gehörigen, auf 1000 Atmosphären geeichten älteren Manometer der Société Genevoise d'instruments de physique

1) Vgl. z. B. F. Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik, 11. Aufl. p. 588.

gemessen, das eine Unsicherheit in der Einstellung von etwa 15 Atm. zeigte; bei den späteren Messungen mit einem auf 1500 Atm. geeichten Manometer von Schäffer und Budenberg, dessen Einstellung auf 2—3 Atm. genau erfolgte.

Die Anordnung der besprochenen Apparate bei dem ersten Teil der Messungen wird durch die folgende schematische Zeichnung (Fig. 3) veranschaulicht.

D ist das Druckgefäß, welches mit dem Manometer *M* und der Druckpumpe in Verbindung steht und von dieser durch den Deltahahn *H* abgesperrt werden kann. *m* sind die aus Meßdraht und Ballastwiderständen bestehenden veränderlichen Zweige der Brücke, an welche in *D* der Wismutdraht,

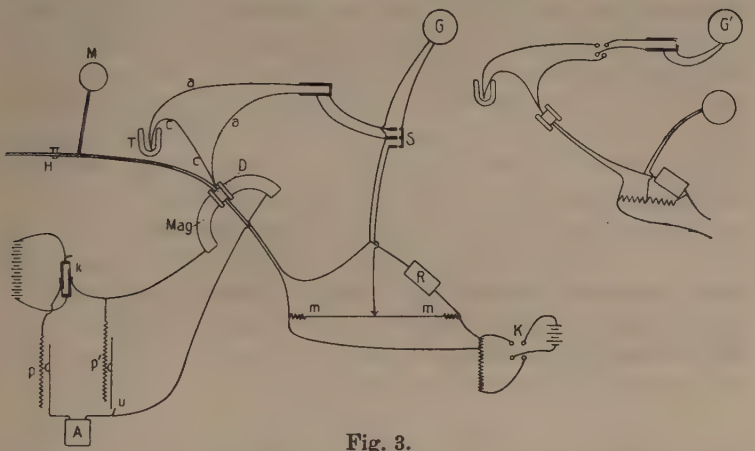


Fig. 3.

in *R* der Rheostat angeschlossen ist; sie liegt im Nebenschluß zu dem durch die Wippe *K* kommutierbaren Stromkreis von zwei bis drei Akkumulatoren. *G* ist das Panzergalvanometer und *S* der Schalter aus Kupfer, welcher jenes je nach Bedarf in den Brückenzweig oder an den Stromkreis des Thermoelements zu schalten oder es kurz zu schließen gestattete. *T* ist das Dewargefäß, in welchem sich die eine Lötstelle des Thermoelements befindet, *c* ist der Konstantandraht, welcher zur zweiten Lötstelle in *D* führt, *a* sind Kupferdrähte, *Mag* ist der du Bois-Magnet von Hartmann & Braun, dessen Wickelungen durch den von der Akkumulatorenbatterie des Instituts gelieferten Strom gespeist werden; die Stromstärke kann durch das in *A* angeschlossene Drehspulampèremeter

von Hartmann & Braun gemessen und durch Ruhstratwiderstände in p reguliert werden. Um den Magneten entmagnetisieren zu können, waren ein Kommutator k und ein in u einschaltbarer Nebenschluß vorgesehen, dessen Widerstand p' ganz ausgeschaltet werden konnte. Die Zeichnung rechts zeigt die Änderung, welche die Anordnung dadurch erlitten hat, daß in den Stromkreis des Thermoelements ein besonderes Galvanometer G' eingeschaltet und der Meßdraht mit Gleitkontakt durch unveränderliche Widerstände ersetzt wurde. Sie bedarf wohl keiner besonderen Erklärung.

Von den vier Segmenten, in welche die Wickelung des du Bois-Magneten geteilt ist, wurden in der Regel auf jeden Schenkel nur drei aufgesetzt, um eine zu große Annäherung an das Druckgefäß und die dadurch bedingte übermäßige Erwärmung von ihm und dem Wismutdraht zu verhindern. Zu diesem Zweck wurde das Druckgefäß bei eingeschaltetem Magnetisierungsstrom anfangs auch mit Hilfe eines Ventilators gekühlt, doch brachte diese notwendigerweise ungleichförmige Abkühlung Störungen, und so erwies es sich in der Folge als besser, die Erwärmung mit Hilfe des Thermoelements zu bestimmen und zu berücksichtigen. Im Gleichgewichtszustand, nachdem der Magnetisierungsstrom einige Stunden eingeschaltet war, betrug die Temperaturerhöhung im Druckgefäß bei einem Magnetisierungsstrom von 2 Amp. etwa 1,2°, bei 5 Amp. etwa 3° über die Temperatur der Umgebung.

Es ist schon erwähnt worden, daß der Wismutdraht in dem Druckgefäß auf einem Elfenbeinplättchen wie auf einer Haspel gewickelt war. Die anfänglich angewandte Art der Wickelung (Drähte 1 bis 3) war dabei die folgende (vgl. die untenstehende Fig. 4). Ein Elfenbeinplättchen von der unten gezeichneten Gestalt und solcher Größe, daß es in das Druckgefäß eingesetzt werden konnte, hatte auf beiden Seiten einen etwa 4 mm breiten erhöhten Rand, im übrigen eine Dicke von etwa 1,5 mm. In den Rand war eine Anzahl Einschnitte angebracht, welche den Wismutdraht aufnehmen konnten. Die Wickelung erfolgte bifilar, indem zunächst die Mitte des Drahtes über die Endzacke a und darauf die beiden Drähte parallel in benachbarte Einschnitte gelegt wurden. Die Enden

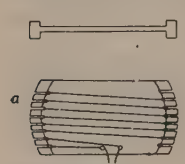


Fig. 4.

des etwa 55 cm langen Drahtes waren, um Thermostrome durch ungleiche Temperatur der Lötstelle zu vermeiden, möglichst nahe beieinander an Kupferdrähte gelötet, die mit Messingschräubchen an dem Elfenbein befestigt waren, und diese Drähte wieder an die in das Innere des Druckgefäßes ragenden, durch die Hartgummikonusse geführten Zuleitungen.

Die Kraftlinien durchsetzten die beiden von den Wismutdrahtstücken begrenzte Fläche jedesmal in entgegengesetzter Richtung, wenn die Drähte von der einen Seite des Plättchens auf die andere traten, und so war die „wirksame" Fläche sehr klein. Der Wismutdraht war durch den vorstehenden Rand auch sehr gut gegen Berührung mit den Eisenflächen geschützt. Hingegen hatte die Anordnung den Nachteil, daß die Drähte längs ihres ganzen Verlaufes nur durch eine dünne Paraffinölschicht voneinander getrennt waren und daß dabei die Enden mit der größten Spannungsdifferenz nebeneinander zu liegen kamen, infolgedessen bei der erwähnten Verunreinigung des Paraffinöls durch Graphitstaub ein unkontrollierbarer Nebenschluß zu Fehlern führen konnte. Auch war bei dieser Wickelungsart, selbst bei dünnen Plättchen, ein merklicher Teil des Drahtes longitudinaler Magnetisierung ausgesetzt.

Es schien darum wünschenswert, den Draht in einer anderen, durch die folgende Fig. 5 veranschaulichten, Weise zu wickeln. Das Plättchen ist auf beiden Seiten mit einer Reihe einander entsprechender Haken versehen, die Mitte des Drahtes befindet sich in *a* und der Draht läuft an dieser Stelle von der einen auf die andere Seite des Plättchens: die beiden Hälften werden einander parallel, aber auf verschiedenen Seiten des Elfenbeinplättchens, über die entsprechenden Haken geführt und jeder auf seiner Seite möglichst symmetrisch an die erwähnten Kupferdrähte gelötet.

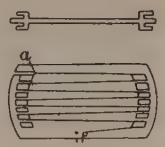


Fig. 5.

Sämtliche Wismutdrähte waren unter Paraffinöl, das auf 110° erhitzt war, gebogen; immerhin bot die Herstellung der Haspeln in der zuletzt erläuterten Anordnung erhöhte Schwierigkeit. Es gelang dem Institutsmechaniker, neben zwei kürzeren Drähten (Nr. 4 und 6) einen von normaler Länge (Draht Nr. 5) aus Wismutdraht von Hartmann & Braun von 0,25 mm Durchmesser in dieser besseren Weise zu wickeln.

3. Ausführung der Beobachtungen.

Für die Beobachtungsart der Druckeinwirkung gab es zwei Möglichkeiten. Man konnte den Wismutdraht für eine ganze Versuchsreihe unter Druck setzen und nun abwechselnd eine Reihe von Messungen mit und ohne Magnetisierungsstrom machen: der Druckeinfluß ergibt sich dabei durch Vergleich der so bestimmten Größe $\frac{w_f - w_0}{w_0}$ mit dem für dieselbe Feldstärke ohne Druck gefundenen Wert. Es ist dies analog der von Henderson und anderen zur Bestimmung des Temperaturkoeffizienten angewandten Beobachtungsweise; dabei ist es von besonderem Vorteil, daß sich auf diese Art Temperaturstörungen durch Kompressionswärme leicht vermeiden ließen. Die Genauigkeit der Messung wird hierbei durch jene bestimmt, mit der sich die Feldstärke in verschiedenen Beobachtungsreihen (den zu vergleichenden Versuchen mit und ohne Druck) reproduzieren bzw. bestimmen läßt. Da der Magnetisierungsstrom an dem nach Zehntel-Ampère geteilten Ampèremeter im günstigsten Falle auf 0,2 Proz. abgelesen werden kann und mit dem Magnetisierungsstrom die Feldstärke wegen der Veränderung der Permeabilität mit der Temperatur usw. nicht einmal eindeutig bestimmt ist, so wäre diese Methode nur anwendbar gewesen, wenn es ein Mittel gegeben hätte, die Feldstärke im Druckgefäß unabhängig vom Druck genügend genau zu messen. In dem kleinen, allseitig abgeschlossenen Raum war dies nun nicht möglich und so mußte zu einem anderen Verfahren gegriffen werden.

Einige Stunden vor dem Beginn der Beobachtungen wurde der Magnetisierungsstrom eingeschaltet und, nachdem ein stationärer Zustand eingetreten war, bei unveränderter Feldstärke abwechselnd eine Reihe von Messungen mit Druck und ohne Druck gemacht. Einer Messung mit Druck konnte dabei das Mittel aus zwei, in gleichen Zeitabständen vor und nach ihr gemachten Messungen ohne Druck gegenübergestellt werden. Wesentliche Bedingung war hierbei die Konstanz oder lineare Veränderung der Feldstärke; sie konnte bei den Messungen ohne Druck durch den Widerstand des Wismuts selbst verfolgt werden. Auf diese Art wurde zunächst der Druckkoeffizient des Widerstandes für verschiedene Feldstärken bestimmt; es

ist leicht, aus ihm die durch Druck hervorgerufene Veränderung von $\frac{w_f - w_0}{w_0}$ zu gewinnen.

Bei diesen Messungen traten die durch Kompression und Dilatation hervorgerufenen Temperaturänderungen in Erscheinung; sie mußten mit Hilfe des Thermoelements auf Grund des für die betreffende Feldstärke geltenden Temperaturkoeffizienten des Wismuts berücksichtigt werden. Für die Genauigkeit der Beobachtungen war es dabei maßgebend, die Versuche ohne und mit Druck so rasch aufeinander folgen zu lassen, daß die Veränderung des Magnetisierungsstromes als linear angesehen werden konnte, daß aber anderseits die Zeit zwischen Kompression (bzw. Expansion) und Messung lang genug war, um die Temperatur des Wismutdrahtes hinreichend genau bestimmen zu können. Dies war erst einige Zeit nach einer Druckänderung möglich, weil die Wärme von den verschiedenen Teilen des Druckraumes ungleich schnell abgeleitet wurde, so daß die Angabe des Thermoelements erst dann der Temperatur des Wismutdrahtes entsprach, wenn der Wärmeausgleich zum größten Teil vollzogen war. Es ergab sich so als das beste, die Beobachtungen ohne und mit Druck in Intervallen von 12 Minuten folgen zu lassen und die eigentliche Widerstandsmessung 9′30″ nach dem Drücken bzw. Expandieren zu machen,

Es wäre irreführend, aus dem parallelen Gang von Widerstand und Ausschlag des Thermoelements Angaben über die Richtigkeit dieser zusammengehörigen Bestimmungen zu machen, da, wie später dargelegt werden soll, auch eine Nachwirkungserscheinung mit hereinspielte, so daß die Genauigkeit der Messungen am besten aus der mittleren Abweichung sich entsprechender Beobachtungen zu entnehmen ist. Der mittlere Fehler betrug 0,00003 des Widerstandes; dies gibt auch die Beobachtungsgenauigkeit an.

Je nach der Anordnung wurde die Art der Messung etwas verändert. Bei Benutzung ein und desselben Galvanometers in der Brücke und im Stromkreis des Thermoelements wurde zunächst eine Temperaturmessung gemacht, sodann das Galvanometer in die Brücke geschaltet und die Brücke zweimal eingestellt, wobei der Strom kommutiert wurde; hierauf wurde von neuem der Thermostrom gemessen. Das Mittel aus beiden Brückeneinstellungen und Thermostrommessungen gab die gesuchten Daten. Bei der definitiven Anordnung mit zwei

Galvanometern und der Interpolation der Rheostatenwiderstände konnten die Temperatur- und die Widerstandsmessung zeitlich näher aneinander gerückt werden. Dabei erfolgten die Beobachtungen nach folgendem Schema:

Nach dem Drücken (bzw. Expandieren) wurden zunächst das Thermometer der äußeren Lötstelle des Thermoelements und das Ampèremeter des Magnetisierungsstroms zur Kontrolle vorgekommener Schwankungen abgelesen, ebenso ein die Temperatur des Zimmers anzeigendes, in der Nähe des Magneten aufgehängtes Thermometer. Im Rheostaten wurde ein aus Vorversuchen bekannter Widerstand gestöpselt, der nahezu eine Einstellung der Brücke hervorbrachte.

Sodann wurde in dem von einer Stoppuhr gegebenen Zeitabstand vom Augenblick des Drückens folgendermaßen beobachtet:

6′ 00″ Galvanometer des geöffneten Thermostromkreises abgelesen (Nullpunkt) und hierauf der Strom geschlossen,
7′ 00″ Strom in der Brücke geschlossen (Richtung *B*),
7′ 10″ Ausschlag des Thermostromes abgelesen,
7′ 30″ Ausschlag des Galvanometers in der Brücke für die Stromrichtung *B* abgelesen und Strom kommutiert (in Richtung *A*),
8′ 00″ Ausschlag des Brückengalvanometers abgelesen (für die Stromrichtung *A*) und kommutiert (in Richtung *B*),
8′ 10″ Ausschlag des Thermostroms abgelesen usw.

— — — — — — — — — — — — — — — —

10′ 00″ wird zugleich mit dem Kommutieren des Brückenstromes (in Richtung *B*) der Rheostatenwiderstand um 0,02 Ω vergrößert,
10′ 10″ Ausschlag des zur Temperaturmessung gehörigen Galvanometers abgelesen und hierauf Thermostrom geöffnet,
10′ 30″ Brückengalvanometerausschlag für den vergrößerten Rheostatenwiderstand abgelesen (Stromrichtung *B*) und kommutiert,
11′ 00″ Brückengalvanometer für die Stromrichtung *A* abgelesen, hierauf der Brückenstrom geöffnet,
11′ 10″ Nullpunkt des Galvanometers des Thermostromkreises von neuem abgelesen.

Hierauf wurde das Manometer abgelesen und der Magnetisierungsstrom auf seine Konstanz kontrolliert.

Mit der zwölften Minute begann ein neuer Versuch, indem die Messungen nach Entfernen (bzw. Herstellen) des Druckes in derselben Reihenfolge wiederholt wurden.

Als die schon erwähnte Nachwirkung in Erscheinung trat, schien es geboten, auch die einzelnen Versuche, die bei einem bestimmten Magnetisierungsstrom gemacht wurden, stets in gleicher Reihenfolge sich folgen zu lassen, um besser vergleichbare Resultate zu erlangen.

Die Reihenfolge war gewöhnlich:

Beobachtung ohne Druck
mit 500 Atm. Druck
ohne Druck
mit 100 Atm. Druck
ohne Druck
mit 300 Atm. Druck
ohne Druck
mit 600 Atm. Druck
ohne Druck
mit 500 Atm. Druck
ohne Druck
mit 500 Atm. Druck
ohne Druck.

Die Berechnung des Widerstandes und des gesuchten Druckkoeffizienten geschah in folgender Weise: seien B und A die Ablesungen des Galvanometers in der Brücke, wenn in ihr der Strom in der Richtung fließt, die wir mit B bzw. mit A gekennzeichnet haben, so ist ihre algebraische Differenz ein Maß für den Betrag, um den der Rheostatenwiderstand R von dem Wert abweicht, den er haben müßte, um die Brücke zur vollständigen Einstellung, d. h. den Strom im Galvanometer zum Verschwinden zu bringen. Ist für den Fall, daß R zu klein ist, die Differenz der Galvanometereinstellungen $B-A$ positiv und sind die beiden unveränderlichen Brückenzweige aus Manganindraht einander gleich (es war dies nicht ganz genau erfüllt, wodurch der Widerstand des Wismuts, das ja stets im gleichen Zweig lag, im betreffenden Verhältnis zu groß oder zu klein bestimmt wurde, was bei den vorliegenden relativen Messungen belanglos war), so ist der Widerstand des Wismutdrahtes $R + a \cdot (B-A)$, wo a ein Proportionalitätsfaktor ist. Die Größe a ließ sich in sehr einfacher Weise aus den jeweiligen letzten zwei Ablesungen, die mit einem um $0{,}02\,\Omega$ vergrößerten Rheostatenwiderstand gemacht waren, entnehmen. Bezeichnet $(B-A)_R$ die Differenz der Galvanometerausschläge, wenn der Rheostatenwiderstand R beträgt, und $(B-A)_{R+0{,}02}$ die betreffende Differenz für den Rheostatenwiderstand $R+0{,}02$, so ist Widerstand des Zweiges mit Wismutdraht in Ω

$$= R + a \cdot (B-A)_R = R + 0{,}02 + a \cdot (B-A)_{R+0{,}02},$$

also

$$a = \frac{0{,}02}{(B-A)_R - (B-A)_{R+0{,}02}}.$$

Dementsprechend wurde die Berechnung des Widerstandes ausgeführt. Die Ablesungen des Galvanometers im Brückenzweig gaben drei Werte $(B-A)_R$ und einen Wert $(B-A)_{R+0{,}02}$, aus den drei ersteren konnte $(B-A)_R$ für die Zeit, zu der $(B-A)_{R+0{,}02}$ gemessen war, extrapoliert und aus diesem a gefunden werden. Der Widerstand des Wismutdrahtes wurde dann auf Grund eines $B-A$, welches aus der Differenz des letzten für den Widerstand R gefundenen B und des Mittels aus dem vorausgehenden und nachfolgenden A erhalten worden war, berechnet. Um nun den Druckkoeffizienten zu bestimmen, mußten die ohne Druck und unter Druck gemessenen Widerstände zueinander in Beziehung gebracht werden. Es geschah dies auf Grund der direkt in Skalenteilen des Thermostromgalvanometers bekannten Temperaturunterschiede aufeinanderfolgender Messungen ohne und mit Druck, indem der ohne Druck gemessene Widerstand für die Temperatur berechnet wurde, für welche die Messung unter Druck gemacht war, und von jedem unter Druck gemessenen Widerstand das Mittel der ohne Druck bestimmten und in dieser Art auf gleiche Temperatur gebrachten Widerstände abgezogen wurde. Die Division dieser Differenzen durch Widerstand und Druck ergab den gesuchten Druckkoeffizienten.

Für die Temperaturkorrektion des Widerstandes mußte der Temperaturkoeffizient des Wismuts ohne Druck für verschiedene Feldstärken bekannt sein. Hierüber lagen hauptsächlich die Messungen von Henderson[1]) vor. Um zu erkennen, wie weit die betreffenden Werte für die untersuchten Drähte Geltung hätten, wurde mit einem Draht von Hartmann & Braun, von dem ein Stück zur Haspel 6 verwendet worden war, eine Bestimmung des Temperaturkoeffizienten für verschiedene Feldstärken gemacht.

Wegen der starken Abhängigkeit des Widerstandes von der Feldstärke und der Schwierigkeit das Feld konstant zu halten, wurde dabei ein solches Verfahren gewählt, daß eine vollständige Bestimmung des Temperaturkoeffizienten mit einer einzigen Messung im betreffenden Feld gemacht werden konnte und es nicht nötig war, Differenzen von Widerständen zu

1) Henderson l. c.

nehmen, die bei verschiedenen Magnetisierungen oder in längeren Zeitabschnitten gemessen waren.

Zu dem Zweck waren in einer Wheatstoneschen Brückenanordnung (vgl. Fig. 6) die Zweige R_1 und R_2 aus Rheostatenwiderständen, die Zweige W_1 und W_2 aus gleichartigen Stücken eines Wismutdrahtes gebildet und letztere so angeordnet, daß sie sich gleichzeitig in einem homogenen Magnetfeld befanden und auf gleiche oder verschiedene Temperatur gebracht werden konnten. Unter der Annahme, daß der Temperaturkoeffizient α für beide Drahtstücke derselbe ist und in dem benutzten Temperaturbereich unabhängig von der Temperatur — was in Hinblick auf den Zweck der Messung hier ohne weiteres erlaubt war — so läßt er sich, wie eine einfache Rechnung zeigt, durch

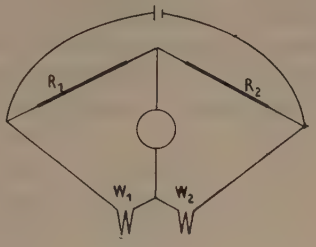


Fig. 6.

$$\alpha = \frac{\left(\frac{R_1}{R_2}\right)_t - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)_0}{t \cdot \left(\frac{R_1}{R_2}\right)_0}$$

darstellen, wobei $\left(\frac{R_1}{R_2}\right)_t$ und $\left(\frac{R_1}{R_2}\right)_0$ das Widerstandsverhältnis der Zweige bedeuten, wenn zwischen W_1 und W_2 die Temperaturdifferenz t Grad herrscht bzw. wenn sie gleiche Temperatur haben.

Ist das Feld homogen und hängt der Widerstand in beiden Drahtstücken in gleicher Weise von ihm ab, so braucht nur $\left(\frac{R_1}{R_2}\right)_t$ im betreffenden Feld gemessen zu sein, während $\left(\frac{R_1}{R_2}\right)_0$ vom Feld unabhängig ist und nur einmal außerhalb des Feldes bestimmt zu werden braucht. Ist dies nicht genau erfüllt, so wird eine Bestimmung von $\left(\frac{R_1}{R_2}\right)_0$ in verschiedenen Feldern notwendig, wobei aber eine kleine Unsicherheit in der Feldstärke sich für die Berechnung von α nur in der Korrektion gewissermaßen als Größe zweiter Ordnung geltend macht.

Die Anordnung war folgendermaßen getroffen (vgl. Fig. 7):

An zwei ähnlichen Kästchen aus dickem Kupferblech von

12 mm Breite, 29 mm Höhe, 5 mm Tiefe waren Messingröhren angelötet, die gestatteten durch die Kästchen einen Wasserstrom fließen zu lassen; außerdem waren kleine Rohrstutzen vorhanden, durch welche in Glasröhren isoliert und mit Siegellack verkittet Zuleitungen zu einem auf einem Elfenbeinplättchen W-förmig ausgespannten Wismutdraht führten. Durch zwei weitere Rohrstutzen waren in ähnlicher Weise die Drähte eines Kupfer-Konstantanthermoelements geführt. Die Drähte im Innern der Kästchen waren isoliert; es hatte dabei einige Schwierigkeit gemacht, einen passenden Lack zu finden, der nur einen dünnen, den Temperaturausgleich nicht hindernden Überzug gab, anderseits die Drähte gegen Wasser genügend gut isolierte. Schellack, Gummilösung, Zaponlack und verschiedene Firnisse gaben unbefriedigende Resultate, schließlich entsprach am besten ein stark verdünnter Emaillelack, der zweimal aufgestrichen wurde. Die Isolation war nicht elektrostatisch, in der Wheatstoneschen Brücke gemessen, betrug jedoch der Übergangswiderstand über 100000 Ω, was für den vorliegenden Zweck genügte. Die beiden Kästchen wurden in einem Abstand von 1,5 cm mit einer Unterlage von dickem Papier zwischen zwei Hartgummiplatten von 2,5 mm Dicke eingekittet. Gegeneinander und nach außen waren sie gegen Wärmeaustausch durch Asbest isoliert, und das Ganze konnte in die Mitte zwischen die flachen Polstücke des du Bois-Magneten gebracht und in seiner Lage fixiert werden. Die Kästchen waren möglichst symmetrisch zur Mittelachse angeordnet, so daß die Wismutdrähte bei einem Polabstand von 12 mm als in einem homogenen Feld befindlich angesehen werden konnten.

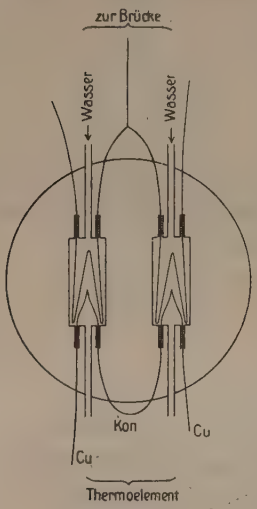


Fig. 7.

Die beiden Widerstände R_1 und R_2 wurden aus Teilen des Wolffschen Präzisionsrheostaten abgezweigt und die beiden Galvanometer für die Brückeneinstellung und die Messung

der Temperaturdifferenz ähnlich wie bei den Druckmessungen benutzt. Für die Temperaturmessung war die Empfindlichkeit des Drehspulgalvanometers verkleinert worden. Um die Temperaturdifferenz herzustellen, wurde mit Benutzung der Rohransätze warmes Wasser durch das eine und kaltes durch das andere Kästchen geleitet; hierzu waren Blechkannen von etwa 25 Liter Inhalt aufgestellt worden, welche 20 Minuten lang den Wasserstrom in den Kupferkästchen speisen konnten. Die Temperatur in der einen Kanne war etwa 10° über, in der anderen ebensoviel unter Zimmertemperatur. Nachdem ein stationärer Zustand eingetreten war, wurde in rascher Folge Widerstand und Temperaturdifferenz bestimmt.

Die folgende Kurve (Fig. 8) veranschaulicht die so bestimmten Temperaturkoeffizienten in ihrer Abhängigkeit von

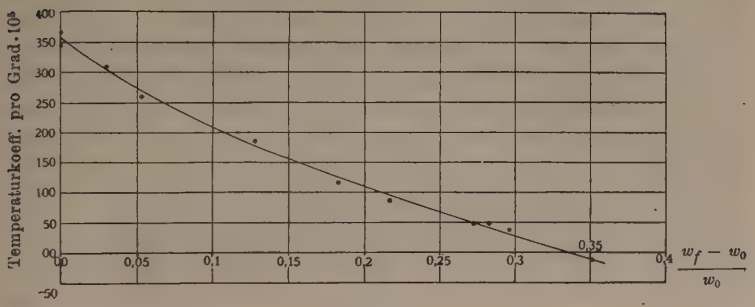


Fig. 8.

der Feldstärke. Die Werte, welche zu einem Satz von Beobachtungen gefunden wurden, entsprechen sich sehr gut: die oberhalb der Kurve eingetragenen gehören zu Beobachtungen, bei denen der eine Draht erwärmt war, die unterhalb liegenden zu solchen, bei denen derselbe Draht abgekühlt war und entsprechen in ihrer Abweichung der Unsymmetrie der Anordnung und der Ungenauigkeit der Feldbestimmung bei verschiedenen Beobachtungen.

Da — wie sich weiter unten ergeben wird — eine genauere Kenntnis des Temperaturkoeffizienten zwecklos gewesen wäre, so wurde nicht gesucht, diese Fehler zu verkleinern.

Die Änderung des Temperaturkoeffizienten mit dem Feld entspricht qualitativ der von Henderson gefundenen.

4. Kritik der Fehlerquellen.

Was die Fehlerquellen anlangt, so wurde schon früher erwähnt, daß die vom Thermoelement gemessene Temperatur nicht die Temperatur des Wismutdrahtes sein mochte, und es ist schon angedeutet worden, warum sich hierfür kein genauer zahlenmäßiger Ausdruck angeben ließ. Zu einer wesentlichen Fälschung der Beobachtungen konnte dies nicht führen, denn wenn wir z. B. einen Versuch unter Druck ins Auge fassen, so ist der Temperaturunterschied zwischen der Lötstelle des Thermoelements und der mittleren Temperatur des aufgehaspelten Wismutdrahtes gewiß nur ein Teil des im Augenblick der Messung vorhandenen Restes der Temperaturerhöhung, die bei der Kompression aufgetreten war. Bedingte diese im Augenblick der Messung noch vorhandene Temperaturerhöhung einen Ausschlag von drei Skalenteilen im Galvanometer des Thermostromes — was etwa nach einer Kompression von 500 Atm. der Fall war — und ist der Temperaturunterschied von Wismutdraht und Thermoelement $^1/_5$ hiervon, also 0,6 Skalenteile, so entspricht dem außerhalb des Feldes — wo der Temperaturkoeffizient am größten ist — für 1 Ω eine Widerstandsänderung von 0,000034; die entsprechende durch 500 Atm. durch Druck hervorgebrachte Widerstandsänderung beträgt 0,007, so daß der Fehler erst in der dritten Stelle in Erscheinung tritt und weniger als 0,5 Proz. der Druckwirkung beträgt. Dies zeigt auch, warum es zwecklos gewesen wäre, den Temperaturkoeffizienten des Wismutdrahtes mit größerer Genauigkeit zu bestimmen.

Eine weitere schon erwähnte Fehlerquelle lag in der Inkonstanz der Feldstärke. Diese war unmittelbar nach dem Schließen des Magnetisierungsstromes ziemlich groß, was sich aus der Erwärmung und der damit bedingten Widerstandserhöhung der Magnetwickelung erklären ließ. Nach einiger Zeit, als der Magnetisierungsstrom merklich konstant geworden war, dauerte sie noch fort und dies mochte wohl in dem allmählichen Eindringen der Wärme in das Innere der Polschenkel und der Änderung ihrer Permeabilität seinen Grund haben. Immerhin war nach 6 bis 7 Stunden, nach welcher Zeit die Messungen begonnen wurden, die Veränderung so langsam, daß eine lineare Interpolation gerechtfertigt schien.

Nur bei stärkeren Magnetisierungsströmen, die man nicht

so lange Zeit ununterbrochen schließen konnte, war die Abweichung vom stationären Zustand etwas größer, was sich in der etwas schlechteren Übereinstimmung der Messungen ausdrückt.

Weiteren Anlaß zu Fehlern hätte eine Verschiebung des Wismutdrahtes im Druckgefäß unter dem Einfluß des Druckes geben können, welche bei inhomogenem Feld bewirken konnte, daß Teile des Wismutdrahtes unter Druck in einem anderen Feld gemessen wurden wie ohne Druck. Die schon mitgeteilte Ausmessung des Feldes hatte gezeigt, daß es merklich homogen war, zur besseren Kontrolle jedoch wurde eine Wismuthaspel (Nr. 3) angefertigt, deren Elfenbeinrahmen etwas kleiner war und im Druckgefäß senkrecht zur Feldrichtung um etwa 2,8 mm verschoben werden konnte. Sie war hierzu an einem Messingstäbchen befestigt, das durch die zum Luftaustritt angebrachte Öffnung aus dem Druckgefäß herausragte. Druckmessungen konnten mit dieser Anordnung natürlich nicht gemacht werden. Dabei ergab sich bei einer Verschiebung der Spirale in einem Feld von 9200 Gauss eine verhältnismäßige Änderung des Widerstandes um 0,00027. Da die Verschiebung durch eine Zusammendrückung des den Draht tragenden Elfenbeinplättchens unter Druck nur einen sehr kleinen Bruchteil der obigen betragen konnte, so brauchte bei den weiteren Messungen auf sie nicht weiter Rücksicht genommen zu werden.

Um zu vermeiden, daß der Druckeffekt durch Spannungen oder Biegungen im Draht beeinträchtigt werde, war bei dem Wickeln der Drähte geachtet worden, an den Biegungsstellen etwas Spielraum zu lassen. Vollständig ist dies bei den Drähten 3, 4, 5, 6 erfüllt, bei denen der Draht an jedem Unterstützungspunkt um etwa 0,1 mm frei beweglich ist. Da man für Elfenbein jedenfalls eine größere lineare Zusammendrückbarkeit anzunehmen hat als für Wismut, so schienen Spannungen auch unter Druck ausgeschlossen.

Die Erwärmung des Wismutdrahtes durch den Strom schien nicht leicht zu falschen Resultaten führen zu können, weil der Strom in der Brücke bei einer Gruppe von Versuchen jedesmal gleich lange geschlossen wurde und stets gleiche Stärke hatte. Wendet man die Formeln an, die in Kohl-

rausch[1]) für die Dauererwärmung von stromdurchflossenen, in Luft gespannten Drähten angegeben werden, so ergibt sie sich für einen 0,25 mm dicken Wismutdraht bei 1 Milliamp. zu 0,0008 Grad; wie erwähnt blieb die Stromstärke in den Brückenzweigen stets unter diesem Wert.

Die Zeitdauer für die Herstellung des Druckes war bei der anfänglich benutzten Pumpe ungleich lang, weil die Ventile öfters versagten, so daß eine gewisse Unsicherheit in die zeitliche Folge der Messungen kam. Mit der späteren ließ sich der gewünschte Druck sehr genau und mit einem Spielraum von etwa 5″ in stets gleich langer Zeit herstellen.

Es wurde jedesmal auf eine runde Zahl von Atmosphären gepreßt (100, 200, 300, 500, 600) und dann das Ventil zur Pumpe gesperrt; in der ersten Minute trat, je nach der Größe des Druckes, eine Abnahme von 3 bis 25 Atm. ein, die nach etwa 3 Minuten mit dem Manometer nicht mehr zu verfolgen war; es konnte so der am Ende des Versuches gemessene Druck schlechthin als der Druck betrachtet werden, unter dem der Wismutdraht während der Messung stand.

Das Panzergalvanometer zeigte einen gewissen Gang, d. h. eine allmähliche Verschiebung des Nullpunktes, diese war jedoch so langsam, daß sie für die Dauer eines Versuches nicht in Erscheinung trat, so daß die verschiedenen mit A und B bezeichneten Ausschläge auf ein und denselben Nullpunkt zu beziehen sind.

5. Ergebnisse der Messungen.

Bei der Besprechung der Beobachtungen sollen die anfänglichen Versuche übergangen werden (Drähte Nr. 1 und 2 von Hartmann u. Braun von 0,25 mm Durchmesser), da sie mit einer zu unvollkommenen Anordnung gemacht wurden, um genauere Resultate zu liefern. Ihr Gesamtergebnis deckt sich mit den allgemeineren Resultaten der späteren Versuche.

Die ersten Messungen in der zuvor ausführlich erläuterten Weise (erste Beobachtungsart mit Einstellung der Brücke durch Verschiebung des Gleitkontaktes) wurden mit einem Wismutdraht von Hartmann u. Braun von 0,25 mm Durchmesser gemacht, dessen Widerstand 13,0 Ω betrug (Draht Nr. 3). Er war bifilar auf einem Elfenbeinplättchen aufge-

1) F. Kohlrausch, Lehrbuch d. prakt. Physik, 11. Aufl. 1910.

wickelt. Tabelle I enthält einen Teil der Beobachtungsergebnisse und die daraus berechneten Druckkoeffizienten des Widerstandes, d. h. die auf die Einheit bezogenen, durch einen Druck von 1 Atm. hervorgebrachten Zunahmen. Sie entspricht in ihrer Anordnung der auf S. 24 dargelegten Berechnungsweise.

Tabelle I.*)

Draht 3.

Beob.-Nr.	p	I_m	Temperatur	Widerst. gemessen Ω	$\frac{w_f - w_0}{w_0}$	H	Temp.-Koeff. für die betreff. Feldstärke	Widerst. Ω bei gleich. Temp.	Mittel d. Ω Wid. ohne Druck	$\gamma \cdot 10^6$
1	00	00	17,043	13,0245	00	00	$0{,}0036_5$	13,0225		
2	650	„	17,111	13,1416	„	„	„	13,1353	13,0241	13,0
3	00	„	17,084	13,0297	„	„	„	13,0257		
4	667	„	17,160	13,1482	„	„	„	13,1406	13,0260	13,2
5	00	„	17,104	13,0313	„	„	„	13,0264		
6	00	3,97	18,84	17,5929	0,350	7950	0,0000	17,5929		
7	655	3,97	19,08	17,7767	„	„	„	17,7767	17,5975	15,5
8	00	3,97	19,13	17,6021	„	„	„	17,6021		
9	661	3,97	19,36	17,7806	„	„	„	17,7806	17,6033	15,2
10	00	3,97	19,41	17,6045	„	„	„	17,6045		
11	00	$1{,}86_5$	20,29	15,1569	0,150	4500	0,0015	15,1503		
12	659	$1{,}86_5$	20,37	15,3050	„	„	„	15,2966	15,1525	$14{,}4_5$
13	00	$1{,}86_5$	20,38	15,1624	„	„	„	15,1548		
14	660	$1{,}86_5$	20,50	15,3091	„	„	„	15,2977	15,1505	$14{,}5_5$
15	00	$1{,}86_5$	20,52	15,1581	„	„	„	15,1463		
16	667	$1{,}86_5$	20,66	15,3108	„	„	„	15,2958	15,1518	14,3
17	00	$1{,}86_5$	20,68	15,1728	„	„	„	15,1573		
18	658	$1{,}86_5$	20,85	15,3216	„	„	„	15,3012	15,1580	14,4
19	00	$1{,}86_5$	20,85	15,1782	„	„	„	15,1588		

*) p Druck in Atmosphären.
I_m Magnetisierungsstrom in Ampère.
H Feldstärke in Gauss.
γ Druckkoeffizient des Widerstandes.

Die umstehende Tabelle II läßt die Abhängigkeit von der Feldstärke und von dem Ausdruck $\frac{w_f - w_0}{w_0}$ erkennen, indem in ihr die Mittel aus gleichartigen Messungen eingetragen sind.

Diese Druckkoeffizienten sind nicht identisch mit der Änderung des spezifischen Widerstandes durch Druck, sondern mit bedingt durch die beim Drücken hervorgerufene Änderung der Dimensionen des Drahtes. Da die Kompressibilität für

Wismut nicht genau bekannt ist, so wurde hier und im späteren diese Einwirkung nicht berücksichtigt. Legt man den in Landold-Börnstein (Voigt) aufgenommenen Wert von $E = 3200$ für Wismut zugrunde und nimmt man $\mu = 0{,}33$ an, so ergibt sich die kubische Kompressibilität $\varkappa = 3{,}1 \cdot 10^{-6}$ kg/cm^2. Wegen der Beziehung Widerstand $R = \sigma \cdot l/q$ ergibt sich dann, daß von dem unmittelbar als $\frac{\text{verhältnismäß. Widerstandsänder.}}{\text{Druck}}$ bestimmten Druckkoeffizienten $^1/_3\,\varkappa$ also $1{,}0 \cdot 10^{-6}$ abzuziehen ist, um die durch Druck hervorgebrachte relative Änderung des spezifischen Widerstandes σ zu erhalten. Der außerhalb des Feldes beobachtete Druckkoeffizient $= 13{,}1 \cdot 10^{-6}$ würde so eine Verkleinerung um 7,6 Proz. erfahren.[1])

Tabelle II.

Draht 3.

$\frac{w_f - w_0}{w_0}$	Feldstärke in Gauss	Druckkoeff. $\gamma \cdot 10^6$
00	00	13,1
0,155	4500	14,4
0,350	7950	$15{,}3_5$

Man sieht aus Tabelle II, daß der Druckkoeffizient im Feld größer gefunden wird wie außerhalb, und zwar ist die Zunahme bedeutend größer als die Abweichung der einzelnen Werte untereinander. Diese ist im allgemeinen kleiner als 2 Proz. und entsprechend gut ist auch die Übereinstimmung der unter gleichartigen Bedingungen gemessenen Widerstände.

Bei diesen Versuchen zeigte sich — wovon sich schon in den anfänglichen Beobachtungen Andeutungen finden —, daß der Widerstand des Drahtes, wenn er nach einer längeren Pause gedrückt wurde, nach Aufhebung des Druckes etwas größer war als vorher. Diese störende Nachwirkung, die weiter unten für sich besprochen sein soll, erschwerte den Vergleich der einzelnen Resultate. Sie wurde bei den späteren Versuchen dadurch unschädlich gemacht, daß die Widerstandsmessung stets gleich lange Zeit nach der Druckänderung erfolgte und

1) Vgl. z. B. K. Baedeker, Elektrische Erscheinungen in metallischen Leitern, p. 22, Braunschweig 1911.

daß der erste Druckversuch jeder Beobachtungsreihe von den weiteren Vergleichen und Mittelbildungen ausgeschlossen wurde.

Um mehr Daten über diese Nachwirkung zu gewinnen, wurden anschließend an Draht 3 einige Versuche mit einer weiteren Haspel gemacht (Draht Nr. 4 von 0,35 mm Durchmesser und 8,0 Ω Widerstand, aus Wismut purissimum von Kahlbaum im Institut gepreßt und in der verbesserten Art, d. h. beiderseitig in Zickzackform auf das Elfenbeinplättchen gewickelt), die hauptsächlich in Hinblick auf Wechselstrommessungen angefertigt worden war. Die Beobachtungen erreichten eine geringere Genauigkeit, da die Brücke für den kleineren Widerstand dieses Drahtes weniger empfindlich war, auch wurden sie frühzeitig durch Wechselstrommessungen unterbrochen. Außerhalb des Magnetfeldes ergaben sie den Druckkoeffizienten zu $8{,}5 \cdot 10^{-6}$, also wesentlich kleiner als bei Draht 3; eine Änderung im Magnetfeld trat in den wenigen Versuchen nicht so deutlich hervor.

Da sich die Möglichkeit ergab, daß die bei Draht 3 und bei den ersten Drähten beobachtete Zunahme des Druckkoeffizienten im Magnetfeld von der besonderen Art der Wickelung abhinge, durch welche, wie früher dargetan worden ist, ein merklicher Teil des Drahtes longitudinaler Magnetisierung ausgesetzt war, so wurde eine Haspel aus Draht von Hartmann & Braun von 0,25 mm Durchmesser und 16,0 Ω Widerstand (Draht Nr. 5) untersucht, die ähnlich wie Draht Nr. 4 in Zickzackform gewickelt war.

Tabelle III enthält die Ergebnisse der Messungen, die wie alle späteren in der als zweite Methode bezeichneten Art, d. h. mit Interpolation der Galvanometerausschläge ohne Gleitbrücke gemacht wurden. In den entsprechenden Tabellen sind nur die Druckversuche eingetragen und die aus je zwei Versuchen ohne Druck und aus dem betreffenden Versuch mit Druck bestimmte, durch den Druck hervorgerufene Widerstandsänderung nebst dem daraus sich ergebenden Druckkoeffizienten. Der auf zwei Dezimalen angegebene Widerstand ist der im Rheostaten gestöpselte Wert. Die Art der Berechnung und wie die Temperaturunterschiede berücksichtigt wurden ist bei der Darlegung der Beobachtungsart S. 24 angegeben worden.

Die Klammer soll diejenigen Beobachtungen zusammen fassen, welche in einer Folge gemacht wurden.

Tabelle III.

Draht 5.

Beob. Nr.	p	I_m	H	$\frac{w_f - w_0}{w_0}$	Widerstand Ω	Durch Druck hervorg. Widerstandsänder. Ω	$\gamma \cdot 10^6$
26	492	00	00	00	16,07	0,0965	12,2
28	495	„	„	„	16,07	0,0972	12,2
31	493	„	„	„	16,09	0,0966	12,2
33	675	„	„	„	16,09	0,1336	$12,2_8$
36	500	2,02	4800	0,142	18,89	0,1164	$12,3_2$
38	493	2,04	„	„	18,89	0,1228	13,2
40	501	2,04	„	„	18,90	0,1231	$13,0_2$
43	500	00	00	00	16,05	0,0979	12,2
45	493	$2,07_5$	4900	0,147	18,93	0,1208	$12,9_3$
47	253	2,07	„	„	18,93	0,0599	12,5
49	515	$2,07_5$	„	„	18,93	0,1288	$13,1_8$
51	780	$2,07_5$	„	„	18,95	0,2064	14,0
54	515	00	00	00	15,96	0,0997	12,1
57	503	4,54	8500	0,385	22,06	0,1500	$13,5_4$
63	190	00	00	00	16,37	0,0355	11,4
65	482	„	„	„	16,37	0,0974	$12,3_5$
68	192	2,01	4750	0,140	18,84	0,0479	13,2
70	487	2,01	„	„	18,85	0,1238	13,5
73	195	2,01	5025	0,184	19,14	0,0497	13,3
75	382	2,01	„	„	19,13	0,0980	$13,3_5$
77	576	2,01	„	„	19,13	0,1490	13,5
79	486	2,01	„	„	19,13	0,1233	$13,2_5$
82	483	00	00	00	16,67	0,0983	12,2
85	481	„	„	„	16,14	0,0945	12,2
88	480	5,94	8800	0,390	22,60	0,1529	14,1
90	482	5,94	„	„	22,60	0,1520	13.9_5
93	483	2,00	4850	0,145	18,98	0,1226	13,3
95	192	2,00	„	„	18,98	0,0478	$13,0_5$
97	383	2,00	4850	0,145	18,98	0,0958	13,2
99	578	2,00	„	„	18,99	0,1459	13,3
101	479	2,00	„	„	18,99	0,1194	13,1
104	482	1,08	3100	0,079	17,52	0,1089	12,9
107	481	00	00	00	16,24	0,0960	13,3
109	96	„	„	„	16,24	0,0166	$10,6_5$
111	288	„	„	„	16,24	0,0579	12,4
113	568	„	„	„	16,25	0,1134	12,3
115	486	„	„	„	16,25	0,0962	12,2
118	477	7,29	9220	0,400	22,89	0,1574	14,4
121	478	5,27	8550	0,365	22,56	0,1522	$14,2_5$
123	94	5,27	„	„	22,36	0,0275	12,4
125	286	5,27	„	„	22,36	0,0900	$14,0_5$
127	553	5,27	„	„	22,36	0,1742	14,1
129	480	5,27	„	„	22,36	0,1500	14,0
131	478	5,27	„	„	22,36	0,1503	$14,0_5$
133	98	5,26	„	„	22,36	0,0285	12,1

Tabelle III (Fortsetzung).

Draht 5.

Beob. Nr.	p	I_m	H	$\frac{w_f - w_0}{w_0}$	Widerstand Ω	Durch Druck hervorg. Widerstandsänder. Ω	$\gamma \cdot 10^6$
136	476	3,22	6950	0,275	20,88	0,1355	13,6
138	97	3,22	„	„	20,88	0,0254	$12,5_5$
140	291	3,22	„	„	20,88	0,0811	$13,3_5$
142	559	3,22	„	„	20,89	0,1584	$13,5_5$
144	476	3,22	„	„	20,89	0,1331	13,4
146	481	3,22	„	„	20,89	0,1345	13,4
149	478	00	00	00	16,07	0,0924	12,0
151	480	„	„	„	16,07	0,0916	11,9
153	479	„	„	„	16,07	0,0917	11,9
155	477	„	„	„	16,07	0,0913	11,9
158	477	3,23	6950	0,298	20,87	0,1340	$13,4_5$
160	477	3,23	„	„	20,88	0,1325	13,3
162	477	3,23	„	„	20,88	0,1320	$13,2_5$
164	479	3,23	„	„	20,88	0,1331	13,3
167	479	5,29	8580	0,392	22,37	0,1485	$13,8_5$
169	478	5,28	„	„	22,37	0,1455	13,6
171	478	5,28	„	„	22,36	0,1464	13,7
175	473	00	00	00	16,87	0,0938	$11,7_5$
177	464	„	„	„	16,87	0,0925	11,8
179	469	„	„	„	16,87	0,0927	11,7

Bei der großen Anzahl der Versuche war eine allmähliche Abnahme des Druckkoeffizienten bemerkbar, die sich bei den früher untersuchten Drähten, wo nur eine kleine Zahl gleichartiger Versuche gemacht wurde, nicht gezeigt hatte. Damit dies deutlich hervortrete, sind in Tabelle IV die gleichartigen Versuche bei einem Anfangsdruck von 500 Atm. nach Feldstärken geordnet in ihrer zeitlichen Folge untereinander gestellt; man erkennt außerhalb des Feldes, wie für die Feldstärke 6950 und 8560 Gauss, wo aneinanderliegende Gruppen von Messungen vorlagen, eine Abnahme des Druckkoeffizienten, während die Messungen einer Gruppe, wenn wir von dem mit einem Punkt gekennzeichneten Anfangswert absehen, gute Übereinstimmung untereinander zeigen. In der folgenden Tabelle V ist eine Zusammenstellung der mittleren Druckkoeffizienten in Abhängigkeit vom Magnetfeld gegeben, wobei die Druckkoeffizienten für den Druck von 500 Atm. herausgegriffen sind. Beim Mittelnehmen ist dabei die Abnahme

Tabelle IV.

Druckkoeffizient von Draht 5 bei versch. Feldstärken in zeitlicher Aufeinanderfolge.

Feldstärke H	00	4800	6950	8560
Druckkoeff. $\gamma \cdot 10^6$	12,35			
		13,5		
		13,25		
	·12,2			
	12,2			
		·13,3		
		13,05		
		13,12		
	·12,3			
	12,2			
				·14,25
				14,0
				14,05
			·13,6	
			13,4	
			13,4	
	·12,0			
	11,9			
	11,9			
	11,9			
			·13,45	
			13,3	
			13,25	
			13,3	
				·13,85
				13,6
				13,7
	11,75			
	11,8			
	11,7			

Tabelle V.

Draht 5.

$\frac{w_f - w_0}{w_0}$	Feldstärke in Gauss	Druckkoeff. $\gamma \cdot 10^6$
00	00	12,0
0,084	3100	12,7
0,180	4800	13,0
0,294	6950	13,35
0,387	8560	13,9
0,402	8800	13,9
0,426	9220	14,3

des Druckkoeffizienten berücksichtigt worden. Fig. 9 stellt die Abhängigkeit des Druckkoeffizienten von der Feldstärke, Fig. 10 von der Größe $\frac{w_f - w_0}{w_0}$ graphisch dar. Man sieht, daß im ersten Fall die Abhängigkeit bis zu 7000 Gauss ungefähr linear ist, und erst für stärkere Felder der Druckkoeffizient beschleunigt zu wachsen scheint, während die Kurve im zweiten Fall eine doppelte Krümmung zeigt.

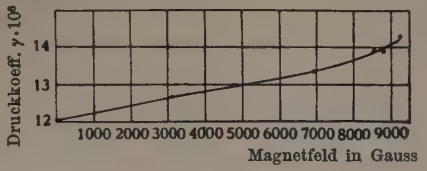


Fig. 9.

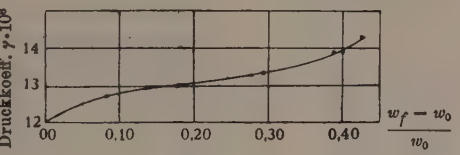


Fig. 10.

Da der Durchschnitt der Widerstandsmessungen in starken Feldern wegen der Erwärmung durch den Magnetisierungsstrom bei höherer Temperatur erfolgte als im Feld Null, so schien es von Interesse, sich zu vergewissern, wie weit der Druckkoeffizient von der Temperatur abhängt. Zu diesem Zweck wurde eine Reihe von Messungen bei einer höheren Temperatur — soweit sie sich durch Heizen des Zimmers herstellen ließ — gemacht. Es sind dies im Magnetfeld Null die Beobachtungen Nr. 81—83, bei welchen der Draht eine Temperatur von etwa 29,3° hatte, und Nr. 175—179 (Temp. 32,3°), sowie in einem Feld von 5000 Gauss die Beobachtungen Nr. 72—80 (Temp. 29,8°). Wie man sieht, ordnen sich die Werte in die bei gewöhnlicher Zimmertemperatur gefundenen gut ein. Die Frage nach der Änderung des Druckkoeffizienten mit der Temperatur ist identisch mit der Frage nach der Änderung des Temperaturkoeffizienten mit dem Druck. Messungen von Hrn. R. Schmidt[1]) im hiesigen Institut, welche auf die Untersuchung dieser letzten Beziehung ausgingen, hatten gezeigt, daß die tatsächliche Änderung so klein ist, daß sie für die bei den vorliegenden Messungen vorkommenden Temperaturunterschiede nicht in Betracht kam.

1) Die Publikation der Arbeit von Hrn. R. Schmidt soll demnächst erfolgen.

Tabelle VI.

Draht 6.

Beob. Nr.	p	I_m	H	$\frac{w_f - w_0}{w_0}$	Widerstand Ω	Durch Druck hervorg. Widerstandsänder. Ω	$\gamma \cdot 10^6$
183	94	00	00	00	25,25	0,0230	9,7
185	181	„	„	„	25,26	0,0479	10,5
187	276	„	„	„	25,26	0,0755	10,8
189	463	„	„	„	25,26	0,1331	11,4
191	457	„	„	„	25,27	0,1272	11,0
			(Nachwirkungsversuch.)				
215	478	00	00	00	25,40	0,1353	11,2
217	97	„	„	„	25,39	0,0231	9,4
219	283	„	„	„	25,40	0,0773	10,8
221	575	„	„	„	25,40	0,1547	10,6
223	480	„	„	„	25,40	0,1347	11,0
226	475	3,32	7100	0,302	32,94	0,2065	13,2
228	97	3,32	„	„	32,95	0,0356	11,1
230	286	3,32	„	„	32,95	0,1193	12,6
232	578	3,32	„	„	32,95	0,2499	13,1
234	484	3,32	„	„	32,96	0,2053	$12,8_5$
236	479	$3,32_5$	„	„	32,96	0,2039	$12,9_5$
238	478	00	00	00	25,26	0,1339	11,1
240	479	„	„	„	25,26	0,1328	11,0
244	480	4,85	9200	0,425	36,06	0,2396	13,8
246	97	4,85	„	„	36,06	0,0395	11,3
248	288	4,85	„	„	36,06	0,1363	13,1
250	573	4,85	„	„	36,06	0,2888	14,0
252	482	4,85	„	„	36,06	0,2365	13,6
255	478	1,49	4680	0,165	29,46	0,1722	12,2
257	477	1,49	„	„	29,46	0,1684	12,0
259	478	1,49	„	„	29,46	0,1728	12,2

Tabelle VII.

$\frac{w_f - w_0}{w_0}$	Feldstärke in Gauss	Druckkoeff. $\gamma \cdot 10^6$
00	00	11,0
0,165	4680	12,1
0,302	7100	12,9
0,425	9200	13,7

Aus Tabelle III geht hervor, daß der Druckkoeffizient sowohl ohne Feld als im Feld bei höherem Druck größer gefunden wird, doch sind die Fehler, größtenteils wegen der Unsicherheit der Druckbestimmung, besonders bei kleineren Drucken so groß, daß es nicht möglich war, die Änderung quantitativ genau auszudrücken.

Um zu erkennen, ob die Dicke des Drahtes einen Einfluß auf die beobachteten Erscheinungen habe, wurde ein Draht von Hartmann u. Braun von 0,15 mm Durchmesser und 25,0 Ω Widerstand (Draht Nr. 6), der auch beiderseitig auf das Elfenbeinplättchen gewickelt war, untersucht. Tabelle VI gibt die gefundenen Druckkoeffizienten, die obenstehende Tabelle VII die mittleren Druckkoeffizienten für 500 Atm. Druck in ihrer Abhängigkeit von der Feldstärke und von $\frac{w_f - w_0}{w_0}$. Die Figg. 11 und 12 geben die entsprechenden Kurven.

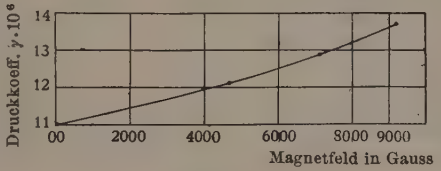


Fig. 11.

Man sieht, daß die Verhältnisse ähnlich sind wie bei dem früher untersuchten dickeren Draht (Draht Nr. 5).

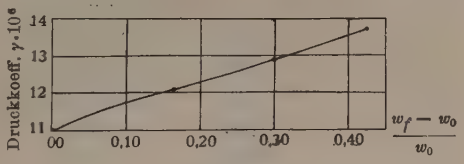


Fig. 12.

Schließlich wurde ein Draht von 0,25 mm Durchmesser, 21 Ω Widerstand, der von Hartmann & Braun in Form einer bifilaren Spirale bezogen war, untersucht (Draht Nr. 7). Die Spirale war ähnlich jenen, welche zur Feldmessung zwischen Glimmerplättchen montiert in den Handel gebracht werden, in Fischleim gebettet, jedoch ohne Glimmer. Sie wurde durch einen Hartgummiring gestützt in die Mitte des Druckgefäßes gebracht und durch kurze Kupferdrähtchen, welche an ihren Enden angelötet waren, mit den Leitungsdrähten verbunden.

Wegen der Fischleimschicht, welche den Draht umgab, erforderte der Temperaturausgleich nach jeder Druckänderung

Tabelle VIII.

Draht 7 (Spirale).

Beob. Nr.	p	I_m	H	$\frac{w_f - w_0}{w_0}$	Widerstand Ω	Durch Druck hervorg. Widerstandsänder. Ω	$\gamma \cdot 10^6$
262	479	00	00		21,13	0,1522	14,9
264	99	„	„		21,14	0,0252	11,9
266	479	„	„		21,14	0,1513	14,9
268	480	„	„		21,15	0,1512	14,9
271	481	2,49	7550	0,327	28,11	0,2319	17,1
273	97	2,49	„	„	28,11	0,0420	15,4
275	289	2,49	„	„	28,11	0,1325	16,3
277	480	2,49	„	„	28,11	0,2262	16,8
279	478	2,48	„	„	28,11	0,2251	16,7
282	480	4,87	9500	0,443	30,55	0,2636	18,0
284	98	4,87	„	„	30,55	0,0482	16,1
286	490	4,85	„	„	30,54	0,2616	17,5
288	483	4,85	„	„	30,54	0,2533	17,2
291	476	00	00	„	21,32	0,1475	14,5
293	97	„	„	„	21,31	0,0258	12,5
295	480	„	„	„	21,30	0,1481	14,5
297	286	„	„	„	21,30	0,0857	14,0

Tabelle IX.

$\frac{w_f - w_0}{w_0}$	Feldstärke in Gauss	Druckkoeff. $\gamma \cdot 10^6$
00	00	14,55
0,327	7550	16,75
0,443	9500	17,6

etwas längere Zeit, und so wurden die Messungen in größeren Intervallen (15′) gemacht.

Tabelle VIII enthält die beobachteten Druckkoeffizienten, Tabelle IX die mittleren Druckkoeffizienten für einen Druck von 500 Atm. in ihrer Abhängigkeit von der Feldstärke.

Der außerhalb des Feldes beobachtete Druckkoeffizient ist hier etwas größer wie bei den Drähten 5 und 6; die Veränderungen erfolgen jedoch qualitativ ebenso wie dort. Ähnlich wie bei Draht 5 scheint auch bei den zuletzt untersuchten Drähten eine Abhängigkeit des Druckkoeffizienten von der Größe des Druckes und — soweit entsprechende Beobachtungen vorliegen — eine Abnahme im Verlauf der Messungen beobachtbar zu sein.

Was die Größe $\frac{w_f - w_0}{w_0}$ anlangt, so ist ihre durch Druck hervorgebrachte verhältnismäßige Änderung aus der Kenntnis des Druckkoeffizienten zu entnehmen; sie ergibt sich zu

$$\Delta_p \left\{\frac{w_f - w_0}{w_0}\right\} = \frac{w_f}{w_f - w_0} (\gamma_f - \gamma_0) p,$$

wenn p der Druck und γ_f und γ_0 die Druckkoeffizienten des Wismuts im Feld und außerhalb des Feldes sind. Die verhältnismäßige Änderung von $\frac{w_f - w_0}{w_0}$ ist also unter sonst gleichen Bedingungen der Differenz der Druckkoeffizienten proportional und positiv, d. h. $\left(\frac{w_f - w_0}{w_0}\right)_p$ ist größer als $\left(\frac{w_f - w_0}{w_0}\right)_0$, wenn γ_f größer als γ_0 ist; sie ist Null, wenn der Druckkoeffizient sich im Magnetfeld nicht ändert. Es schien jedoch zweckmäßiger, die Einwirkung des Druckes auf den Druckkoeffizienten, dessen Berechnung sich an die Beobachtung enger anschließt, zu verfolgen.

Außerhalb des Feldes wurde der Druckkoeffizient durchwegs kleiner gefunden als durch Williams, indem an Stelle des von Williams für einen Draht von Hartmann & Braun angegebenen Wertes $19{,}6 \cdot 10^{-6}$, für die untersuchten Drähte sich die Werte

$13{,}1 \cdot 10^{-6}$ (Draht 3)
12,0 (Draht 5)
11,0 (Draht 6)
$14{,}5_5$ (Draht 7, Spirale)

ergaben.

Beachtet man die Unterschiede dieser Zahlen untereinander, so dürfte es gerechtfertigt erscheinen, die Abweichungen auf Verschiedenheiten des Materials zurückzuführen. Verkleinernd auf die gefundenen Werte wirkte auch der Umstand, daß, mit Ausnahme der Beobachtungen bei Draht 4, vor dem Beginn der Messungen ein Druck von 700 bis 800 Atm. ausgeübt wurde, um die Dichtungen zu prüfen und die anfänglich besonders starke einer Druckeinwirkung nachfolgende Widerstandsänderung zu verkleinern. Ferner, daß bei der Berechnung der oben angegebenen mittleren Druckkoeffizienten die ersten Werte zu Beginn einer Beobachtungsreihe, die wie erwähnt etwas größer sind, fortgelassen wurden. Bei den Messungen von Williams, welcher kein Thermo-

element zur Korrektion der Temperaturänderungen in das Druckgefäß eingebaut hatte, mußten die Messungen naturgemäß in größerem zeitlichen Abstand gemacht werden, so daß die einer Druckänderung noch nachfolgende Widerstandsänderung in höherem Maße zur Geltung kam.

6. Nachwirkungserscheinungen.

In dem im vorhergehenden Abschnitt im Anschluß an die zeitliche Folge der Versuche gegebenen Bericht mußte öfters auf störende Nebenerscheinungen hingewiesen werden, die den Charakter einer Nachwirkung hatten.

Da eine solche bei derartigen Versuchen gewöhnlich nicht beobachtet wird[1]), so sei es gestattet etwas näher auf sie einzugehen.

Wurde der Wismutdraht nach einer längeren Ruhepause einem Druckversuch unterworfen, so war der in der beschriebenen Weise gemessene Widerstand nach dem Drücken etwas größer als vorher, während sich bei unmittelbar darauffolgender Ausübung desselben Druckes innerhalb der Grenzen der Versuchsgenauigkeit keine weitere Änderung des Widerstandes zeigte. Eine solche trat jedoch wieder ein, nachdem der Draht einem höheren Druck ausgesetzt worden war.

Diese Erhöhung des Widerstandes wurde regelmäßig beobachtet und ist z. B. in Tabelle IV an den mit einem Punkt gekennzeichneten, aus den ersten Versuchen einer Beobachtungsreihe gewonnenen Druckkoeffizienten zu verfolgen, indem die Art ihrer Berechnung es mit sich brachte, daß der anfänglich kleinere Widerstand bei der Mittelbildung dahin wirkte, den Einfluß des Druckes größer erscheinen zu lassen.

Bei den ersten Versuchen mit einem neuen Draht und nach Ausübung eines besonders hohen Druckes war die Zunahme des Widerstandes größer, später betrug sie nach den gewöhnlichen eintägigen Ruhepausen (die Versuche konnten, wie schon erwähnt, nur in der zweiten Hälfte der Nacht gemacht werden und der Draht blieb die übrige Zeit ungedrückt) der Größenordnung nach 0,02 Proz. des Widerstandes.

Es lag nahe, diese Widerstandsänderung auf einen systematischen Fehler, zunächst auf eine falsche Berücksichtigung

1) Vgl. Lussana, N. Cim. (4) **10.** p. 731. 1899; (5) **5.** p. 305. 1903 u. Lisell, Diss. Upsala 1902.

einer in Verbindung mit dem ersten Druckversuch auftretenden besonders großen Temperaturänderung zurückzuführen. Doch war sie hierfür zu groß, da ein Fehler in der Temperaturkorrektion von $^1/_{18}$ Grad unterlaufen sein mußte, um sie zu erklären, auch wurde sie im Magnetfeld im selben Sinne beobachtet, wie außerhalb desselben, obwohl der Temperaturkoeffizient des Wismuts im Magnetfeld rasch abnimmt und in stärkeren Feldern sein Vorzeichen umkehrt. Beispielsweise zeigen dies sehr deutlich die Versuche 6 und 8 (Tabelle I), die in einem Feld von 7950 Gauss gemacht wurden, in welchem der Temperaturkoeffizient sehr klein ist. Vor Versuch 6 war der Draht zwei Tage nicht gedrückt worden, Versuch 8 ist unmittelbar nach Einwirkung eines Druckes von 655 Atm. gemacht; der Widerstand wurde bei Versuch 8 um 0,052 Proz. größer gefunden, als bei Versuch 6. Ferner die Versuche mit Draht 4, bei welchem sich das Hauptaugenmerk auf die Beobachtung der erstmaligen Einwirkung eines starken Druckes richtete. Es wurde der Widerstand des Drahtes nach Einsetzen in das Druckgefäß zunächst ohne Feld und in einem Feld von 5250 Gauss bestimmt (welches gut konstant zu halten ist und in dem der Temperaturkoeffizient doch bedeutend kleiner ist wie außerhalb des Feldes), und in diesem Feld der erste Druckversuch (655 Atm.) vorgenommen. Es ergaben sich so auf gleiche Temperatur gebracht die

Widerstände in Ω	außerhalb des Feldes	im Feld
vor dem Drücken	7,9387	9,5040
nach dem Drücken	7,9605	9,5284

also eine Zunahme des Widerstandes nach dem ersten Drücken von etwa 0,28 Proz. bzw. 0,26 Proz.

Um mehr Einblick in den Verlauf dieser Widerstandsänderungen zu gewinnen, wurden mit Draht 6, für welchen der Temperaturkoeffizient bestimmt worden war, so daß eine genauere Berücksichtigung der Temperatur erfolgen konnte, einige Messungsreihen gemacht, in denen die Veränderung des Widerstandes nach einer Druckeinwirkung längere Zeit hindurch verfolgt ward. Es geschah dies nur an dem ungedrückten Draht nach Aufhebung des Druckes, da die entsprechenden Beobachtungen unter Druck durch die unvermeidlichen Schwankungen desselben beeinflußt worden wären.

Die Ergebnisse dieser Versuche sind in den Kurven Figg. 13 bis 15 dargestellt. In ihnen sind die auf gleiche Tem-

Versuch I, Temp. 19,2°.

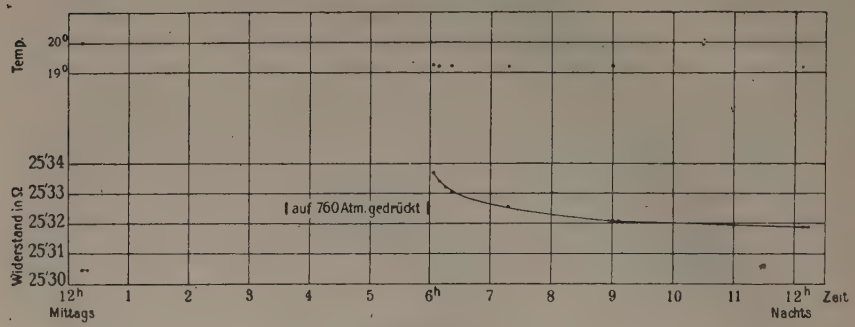


Fig. 13.

Versuch II. Temp. 17,6°

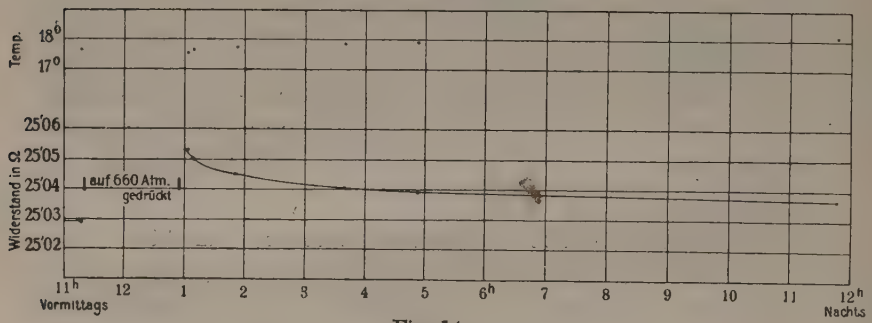


Fig. 14.

Versuch III. Temp. 18,8°.

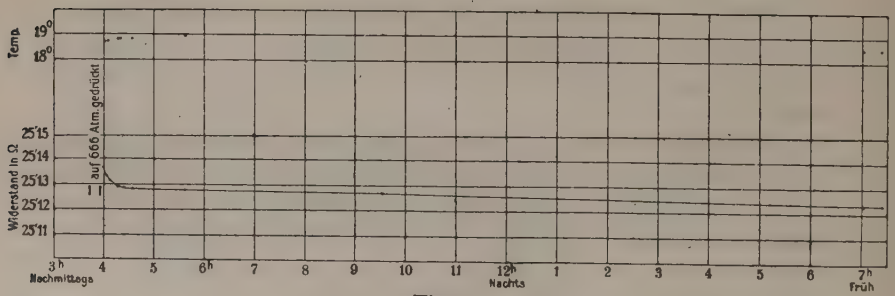


Fig. 15.

peratur gebrachten Widerstände als Ordinaten, die Zeiten als Abszissen eingetragen. Die Zeitpunkte des Drückens und Entspannens sind durch senkrechte Striche bezeichnet.

Versuch I fand nach den ersten gewöhnlichen Druckversuchen mit Draht 6 nach einer Ruhepause von drei Tagen statt. Versuch II und III geschahen nacheinander, nachdem die gewöhnlichen Druckversuche und ein Teil der Gleichstrom-Wechselstrommessungen gemacht waren; vor Versuch II war der Draht einen Tag, zwischen Versuch II und III auch einen Tag ungedrückt gewesen. Der Vergleich von I und II zeigt, daß bei den ähnlich langen Druckeinwirkungen auch ein ähnlicher Verlauf der nachfolgenden Widerstandsänderung erfolgt, während der erste Teil der Widerstandsänderung nach dem kurzen Drücken in Versuch III wesentlich rascher verläuft. Dabei wurde gesucht, die Temperatur bei Versuch III auf einem mittleren Wert zu halten, um der Möglichkeit zu begegnen, daß die Verschiedenheit des Verlaufs der Erscheinung von ihrer Änderung herrühre.

Was die Richtigkeit der eingetragenen Werte anlangt, so muß bemerkt werden, daß die Angaben, obwohl die Messungen ähnlich gemacht wurden wie es früher beschrieben worden ist, doch ein geringeres Maß von Genauigkeit besitzen, weil bei der langen Dauer der Versuche die Temperatur der äußeren Lötstelle des Thermoelements nicht als konstant angesehen werden konnte, sondern für jede einzelne Messung an dem Thermometer abgelesen werden mußte, so daß die Temperaturmessung nur auf die Ablesegenauigkeit des Quecksilberthermometers, d. h. auf etwa $0{,}02^0$ richtig ist (die entsprechende Widerstandsänderung beträgt $0{,}002\ \Omega$); ferner aber eine unrichtige Bestimmung des Temperaturkoeffizienten hier, bei dem größeren Betrag der Temperaturunterschiede, zu größeren Fehlern führen konnte. Um zu erkennen, wieweit solche Änderungen der Temperatur an dem Verlauf der Kurve beteiligt sein mögen, ist die zu den einzelnen Beobachtungen gehörige Temperatur oberhalb der Widerstandswerte eingetragen.

Der raschere Verlauf der Widerstandsänderung nach einer kurzen Druckeinwirkung macht es wahrscheinlich, daß es sich dabei um eine elastische Nachwirkung im Gegensatz zu einer Umwandlung handelt, wobei die Möglichkeit einer solchen Nachwirkung wohl in der unregelmäßigen kristallinischen Struktur

der Drähte zu suchen ist. Eine Beobachtung des Verlaufes der Erscheinungen bei verschiedenen Temperaturen wäre geeignet, hierin Einsicht zu geben, doch war der benutzte Apparat hierzu nicht zu gebrauchen und die Untersuchung lag außerhalb des Rahmens der vorliegenden Versuche.

Extrapoliert man die Kurve von Versuch I für den Zeitpunkt der Aufhebung des Druckes, so ergibt sich für ihn der Widerstand zu 25,339 Ω, also um 0,079 Proz. größer als nach 6 Stunden, es scheint somit nicht möglich, diese Nachwirkung des Widerstandes auf eine Nachwirkung der durch Druck hervorgebrachten und in Abschnitt 5 besprochenen Änderung der Dimensionen des Drahtes zurückzuführen, da sich diese auf Grund der anfangs gegebenen Werte für 760 Atm. Druck zu 0,076 Proz. ergeben würde, also nicht größer wäre wie die Nachwirkung; diese ist auch im wesentlichen als homogene Deformation zu denken. Ist somit die Erscheinung auf die Änderung des spezifischen Widerstandes des Wismuts zurückzuführen, und nimmt man an, daß eine Nachwirkung nur bei nicht homogenen Einwirkungen möglich ist, so ergibt sich, daß eine solche bei der beobachteten Widerstandszunahme des Wismuts durch Druck hereinspielen muß.

Wenn sich die besprochene Nachwirkung bei früheren Untersuchungen nicht so deutlich zeigte, so dürfte dies darin seinen Grund haben, daß sie wohl wesentlich an die besondere Struktur der Wismutdrähte geknüpft ist und daß es bei den bisherigen Bestimmungen des Druckkoeffizienten dieses Metalles nicht so sehr angestrebt wurde, die Widerstandsmessungen möglichst nahe an die Druckänderungen heranzurücken, wie es bei den vorliegenden Versuchen geschehen mußte.

II. Wechselstrom-Gleichstromeffekt.

7. Überblick und Versuchsanordnung.

Zur Untersuchung des Einflusses allseitigen Druckes auf den Wechselstrom-Gleichstromeffekt des Wismuts wurde die ursprüngliche Methode der Messung in der Wechselstrombrücke gewählt, wie sie von Lenard und anderen angewandt worden war[1]), um Resultate zu erlangen, welche mit denen

1) Vgl. P. Lenard, Wied. Ann. **39.** p. 619. 1890; Lenard u. Howard, Elektrotechn. Zeitschr. **9.** p. 340. 1888; G. H. Zahn, Wied. Ann. **42.** p. 351. 1891; B. Wolff, Diss. Würzburg 1897 und andere.

jener früheren Untersuchungen unmittelbar vergleichbar wären.

Bekanntlich zeigt im allgemeinen ein Wismutdraht einen etwas verschiedenen Widerstand für Wechselstrom und für Gleichstrom und außerdem eine gewisse Reaktanzwirkung. Bildet er einen Zweig einer Wechselstrommeßbrücke, so kann ein Telephon in der Diagonale nur dann vollständig zum Schweigen gebracht werden, wenn man in den Zweig des Wismuts eine Selbstinduktion oder in einen anliegenden Zweig eine Kapazität schaltet. Im starken transversalen Magnetfeld können sich die Verhältnisse insofern umkehren, als der Wismutdraht in ihm die Eigenschaften eines Leiters mit Selbstinduktion zeigt.

Da einige Vorversuche gezeigt hatten, daß nur ein sehr geringer Einfluß des Druckes auf diese Erscheinungen zu erwarten war, so wurde von vornherein gesucht, die Meßanordnung möglichst empfindlich zu gestalten.

Die beiden veränderlichen Zweige der Brücke bestanden ganz aus Manganin: zu beiden Seiten des 1 m langen Meßdrahtes waren nach Chaperon gewickelte Ballastwiderstände von 23 Ω Widerstand angeschlossen. Die Dicke des Meßdrahtes war so bemessen, daß 100 mm Brückenverschiebung einer Änderung des Widerstandsverhältnisses um etwa 0,9 Proz. entsprach.

Um die Reaktanz des Wismutdrahtes zu kompensieren, wurde anfänglich versucht, eine in Serie geschaltete Selbstinduktion zu verwenden, wie es bei früheren Messungen geschehen war.[1]) Es stand jedoch keine geeignete variable Selbstinduktion zur Verfügung, und die Kombination eines Satzes von Selbstinduktionen schien darum nicht angezeigt zu sein, weil sie sich gegenseitig hätten beeinflussen können, mit ihrem Zuschalten eine Widerstandsänderung verbunden gewesen wäre und das jedesmalige Probieren die rasche Folge der Messungen unter Druck und ohne Druck beeinträchtigt hätte. Daher wurden kleine Selbstinduktionen verwendet, welche durch einen mit Emaillelack isolierten Kupferdraht gegeben waren, der ständig im betreffenden Zweig eingeschaltet war und je nach Bedarf einige Male um einen Glaszylinder

1) Vgl. z. B. E. Schnorr von Carolsfeld, Diss. München 1904.

gewickelt werden konnte. Um die Intervalle zu überbrücken, welche durch das Hinzutreten einer Windung entstanden, mußten bisweilen einige Eisendrähte in den Glaszylinder eingeführt werden. Dies mochte Fehler durch die mit der Anwesenheit von Eisen verbundenen Hysteresisverluste bedingen, außerdem war auch die Größe der Reaktanzwirkung des Wismutdrahtes nur ungenau zu entnehmen. Es wurde daher bei den späteren Versuchen die Kapazitanz des Wismutdrahtes mit einem im anliegenden Zweig parallel zum Widerstand geschalteten Kondensator kompensiert und die Brücke im übrigen möglichst kapazitäts- und selbstinduktionsfrei gehalten. Mit dieser Anordnung wurden alle früheren, mit Benutzung von Selbstinduktionen gemachten Messungen wiederholt, es zeigte sich dabei im wesentlichen eine Übereinstimmung der Ergebnisse. Als Kondensator stand ein Präzisionsglimmerkondensator von Siemens sowie ein Boasscher Drehkondensator zur Verfügung. Sie wurden parallel geschaltet: mit dem Drehkondensator konnte die kleinste Stufe des Glimmerkondensators (0,001 M.F.) überbrückt und so die Kapazität kontinuierlich variiert werden. Die Verwendung eines Glimmerkondensators war nicht ganz einwandfrei, weil zu erwarten stand, daß etwaige Rückstandsverluste in Abhängigkeit von der Frequenz auftreten würden. Ein diesbezüglicher Versuch zeigte, daß bei Veränderung der Frequenz von 1700 auf 3400 Per./Sek. sich die Kapazität um weniger als 1 Proz. änderte; da die Einstellung des Kondensators dieses Maß von Genauigkeit nicht erreichte, so konnte der Fehler vernachlässigt werden.

Als Widerstand in dem Kondensatorzweig wurden ein Stöpselrheostat von Edelmann und ein nach Chaperon gewickelter Widerstand aus Manganindraht hintereinander geschaltet. Es hatte sich ergeben, daß in dem Edelmannwiderstand die Stücke bis 4 Ohm merklich induktions- und kapazitätsfrei waren, nicht so hingegen die größeren; durch Hinzunahme des selbstgefertigten Manganinwiderstandes, welcher je nach Bedarf verschiedene Größe hatte, brauchten nur die kleineren Stücke des Edelmannrheostaten verwendet zu werden, um eine Einstellung in der Mitte des Meßdrahtes zu erhalten.

Als Wechselstromquelle diente eine Sirene von Siemens & Halske, große Type; zum Einstellen der Brücke für Wechselstrom ein Telephon von Hartmann & Braun. Ein solches

konnte verwendet werden, weil die sehr wesentliche Bedingung, die Brücke für einen Strom von wohl definierter Frequenz einzustellen, durch die Sirene genügend erfüllt war. Wurde in den an die Sirene angeschlossenen Wechselstromkreis eine entsprechende Kapazität und Selbstinduktion geschaltet, um Resonanz für die Grundfrequenz der Sirene herzustellen, so war diese sehr rein und von störenden Oberschwingungen frei. Für die Einstellung mit Gleichstrom diente ein Drehspulgalvanometer von Siemens & Halske. Um nicht bei abwechselnder Beobachtung mit Wechselstrom und mit Gleichstrom, im Falle die Stärke des Gleichstroms verschieden war von der effektiven Stärke des Wechselstroms, eine Änderung des Widerstandes durch ungleiche Erwärmung des Drahtes zu erhalten, war ein Hitzdrahtinstrument ständig in den Stromkreis eingeschaltet. Vor jedem Versuch wurde die Stärke des Gleichstroms solange verändert, bis die Ausschläge für Gleichstrom und für Wechselstrom gleich groß waren.

Gemessen wurden die zur Bestimmung der Druckkoeffizienten hergestellten Haspeln in dem ausführlich beschriebenen Druckgefäß. Das Druckgefäß war auch wie bei den früheren Versuchen zwischen den Schenkeln des du Bois-Magneten montiert, so daß die Wismutdrähte transversal magnetisiert werden konnten.

Die nebenstehende schematische Skizze (Fig. 16) läßt die Anordnung erkennen. *m* ist der Meßdraht mit angefügten Ballastwiderständen, *B* der im Druckgefäß eingeschlossene Wismutdraht; *r* und *R* stellen den selbstinduktionsfreien Widerstand aus

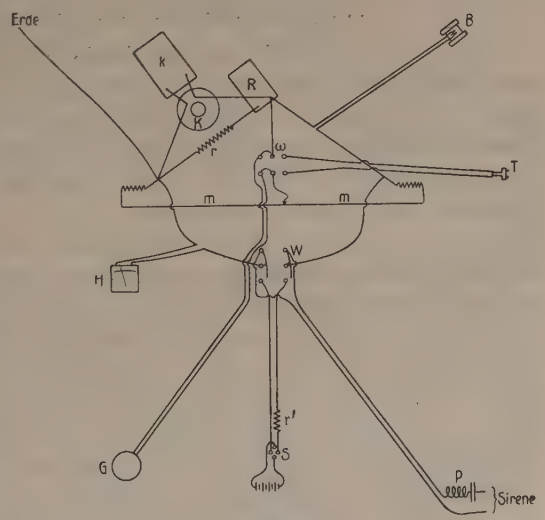


Fig. 16.

Manganindraht und den in Serie geschalteten Rheostaten von Edelmann dar. k und K sind die parallel geschalteten Kapazitäten: der Glimmerkondensator von Siemens und der Drehkondensator von Boas. H ist ein als Ampèremeter benutztes Hitzdrahtinstrument von Hartmann & Braun, welches die Stromstärke in der Meßbrücke anzeigte. W und w sind Quecksilberwippen: die Bügel der Wippe w ließen sich um eine senkrechte Achse schwenken und erlaubten, das Telephon T oder das Drehspulgalvanometer G in den Brückenzweig einzuschalten, in W konnte die Brücke mit dem Akkumulator für Gleichstrommessungen oder mit der Sirene zur Einstellung mit Wechselstrom verbunden werden. Der Gleichstrom konnte in S kommutiert werden, ein Widerstand r' ließ seine Stärke verändern. Die Kapazität und Selbstinduktion in P erlaubte, den Wechselstromkreis auf Resonanz einzustellen.

Um lange Drähte in der Brücke zu vermeiden, war die Anordnung auf einem Tisch in unmittelbarer Nähe des Magneten aufgestellt, wobei ähnlich wie in der Skizze auf möglichste Symmetrie der Brücke geachtet wurde. Um eine Veränderung von etwaigen Selbstinduktionen der Leitungen während der Messung zu vermeiden, waren sämtliche Drähte längs ihres Verlaufes an mehreren Stellen mit Wachskitt befestigt.

8. Ausführung der Beobachtungen.

Der Gang einer Messung verlief in folgender Weise: Nachdem der du Bois-Magnet entmagnetisiert oder ein bestimmter Magnetisierungsstrom eingeschaltet war, wurde die Sirene in Gang gesetzt und nach Erlangung konstanter Frequenz durch passende Wahl der Widerstände r und R erreicht, daß das Minimum des Telephongeräusches bei einer mittleren Stellung des Gleitkontaktes auf der Brücke eintrat. Sodann wurde der Gleichstrom eingeschaltet und durch Verändern des Widerstandes r' seine Stärke so reguliert, daß er an dem Hitzdrahtinstrument H einen ebenso großen Ausschlag erzeugte, wie der Wechselstrom. Nun wurde nach etwa einer halben Stunde, während deren die Brücke, um einen stationären Zustand eintreten zu lassen, von Wechselstrom oder Gleichstrom durchflossen war, zur eigentlichen Messung geschritten. Es wurde durch Verschieben des Gleitkontaktes und Verändern von k und K das Widerstandsverhältnis und die Kapazität für

Wechselstrom gesucht, für welche das Telephon vollständig zum Schweigen gebracht werden konnte und die Einstellung des Gleitkontaktes abgelesen, sodann wurde die Einstellung für Gleichstrom unter Einschaltung des Galvanometers in den Brückenzweig gesucht, wobei Thermoströme durch Kommutieren des Stromes in S eliminiert wurden, dann wurde die Brücke wieder für Wechselstrom eingestellt usw.

Da das Galvanometer durch einen Nebenschluß von kleinem Widerstand sehr stark gedämpft war, so erfolgte die Einstellung ziemlich rasch, so daß bei einiger Übung eine Gruppe von etwa neun abwechselnden Gleichstrom- und Wechselstromeinstellungen der Brücke in 8 Minuten gemacht werden konnte.

Hierauf wurde der Wismutdraht unter Druck gesetzt und nach 12—15 Minuten, nach welcher Zeit auf Grund von früherer Erfahrung die Kompressionswärme merklich abgeleitet war, eine neue Gruppe von Beobachtungen in der eben beschriebenen Weise gewonnen. Sodann wurde der Druck entfernt und nach Ablauf einer genügenden Zeit die erste Messungsgruppe (ohne Druck) wiederholt. Zu Beginn wie zum Schluß jeder Gruppe von Messungen wurde das Ampèremeter des Magnetisierungsstromes und bei Beobachtungen unter Druck das Manometer abgelesen.

In der Regel bestand eine solche zu einem Versuche gehörige Gruppe von Messungen aus 5 Wechselstrom- und 4 dazwischenliegenden Gleichstromeinstellungen; durch Mittelnahme aus den zusammengehörigen Ablesungen wurde die Einstellung der Brücke und des Kondensators gewonnen, zu welchen die in den Tabellen aufgenommenen Werte von Widerstand und Kapazität gehören.

9. Erreichte Genauigkeit und Fehlerquellen.

Die Einstellungsgenauigkeit der in Millimeter geteilten Brücke war für Gleichstrom gleich der Ablesegenauigkeit, also 0,1 mm. Für Wechselstrom betrug sie für die geringere Frequenz etwa 0,3 mm, für die größere etwa 0,5 mm, was einer Genauigkeit der Widerstandsbestimmung für Gleichstrom von 0,001 Proz. und für Wechselstrom von 0,0025 bzw. 0,004 Proz. entspricht. Der Gleichstrom-Wechselstromeffekt außerhalb des Magnetfeldes betrug bei den untersuchten Drähten von

Hartmann & Braun etwa 0,13 Proz. des Widerstandes bei der kleineren, 0,2 Proz. bei der größeren Frequenz, so daß er auf Grund einer einzelnen Beobachtung sich mit einer Genauigkeit von 2 Proz. bestimmen ließ.

Dadurch, daß bei jedem Versuch abwechselnd mehrere Wechselstrom- und Gleichstrommessungen gemacht wurden, wurde der wahrscheinliche Fehler des Mittelwertes beträchtlich kleiner und es konnten Fehler, welche durch Änderung der Frequenz, des Magnetisierungsstromes, des Druckes und der Temperatur während des Versuches auftreten mochten, eliminiert werden. Die Unterschiede der einzelnen Einstellungen untereinander, die auf derartige Schwankungen zurückzuführen sind, betrugen höchstens 1,2 Skalenteile, bei vier Beobachtungen reduziert sich der wahrscheinliche Fehler[1]) im schlimmsten Fall (d. h. wenn bei jeder Beobachtung eine solche Abweichung vorkam) auf 0,4 Skalenteile des Brückendrahtes. Es ist hierbei abgesehen von einigen größeren plötzlichen Änderungen, die für sich berücksichtigt wurden und die auf ganz bestimmte Ursachen zurückgeführt werden konnten, wie z. B. eine Schwankung des Magnetisierungsstromes, wenn eine Bogenlampe an die Akkumulatorenbatterie geschaltet wurde, die die Wickelungen des Magneten speiste. Da die Konstanz des Magnetisierungsstromes nur auf etwa 0,5 Proz. festgestellt werden konnte, der Druck, wie früher dargelegt wurde, sich höchstens auf 0,2 Proz. genau bestimmen ließ und die Frequenz der Sirene von einem Versuch zum anderen unkontrollierbaren Änderungen bis zu 8 Proz. unterworfen war, so überschreitet die Widerstandsbestimmung das Maß von Genauigkeit, welches mit der gegebenen Anordnung überhaupt zu erreichen war. Bei der Ausmessung der Haspel aus Institutsdraht, deren Widerstand 8,0 Ω betrug, war die Einstellgenauigkeit für Wechselstrom nur etwa $^1/_3$ der oben angegebenen. Es lag dies daran, daß ihr Widerstand bedeutend kleiner war als der Widerstand der Meßzweige der Brücke, so daß diese von dem Optimum der Empfindlichkeit, welches bekanntlich dann gegeben ist, wenn der Widerstand in allen vier Zweigen gleich groß ist, ziemlich weit entfernt war. Da bei dieser Spirale der Gleichstrom-Wechselstromeffekt besonders groß war (0,4 Proz.), so ergab sich immerhin eine Meßgenauigkeit

1) Vgl. z. B. Chwolson, Lehrbuch d. Physik 1. p. 282.

der Einzelbeobachtung von 3 Proz. und so wurde von der Zusammenstellung einer empfindlicheren Brücke abgesehen, da vorwiegend die qualitative Seite des Verhaltens von Interesse schien.

Die Größe der Kapazität, die zugeschaltet werden mußte, um jene des Wismutdrahtes zu kompensieren, ließ sich nicht durchwegs so genau angeben, da je nach ihrem Betrag erst eine Änderung von 0,0001 bis 0,0003 Mikrofarad das Telephonminimum deutlich verschlechterte. Dementsprechend sind die Angaben über die kompensierende Kapazität bei den Drähten von Hartmann & Braun auf 1—5 Proz. genau, bei der Haspel aus im Institut gepreßtem Draht beträgt die Genauigkeit etwa 2 Proz.

Was systematische Fehler anlangt, so ist schon bei der Beschreibung der Anordnung auf die Hysteresis der Eisendrähte bei der Verwendung von Selbstinduktionen und auf den Rückstand des Glimmerkondensators hingewiesen worden. Ein Fehler konnte, im Falle die Haspel eine merkliche Selbstinduktion besitzen sollte, auch dadurch entstanden sein, daß diese im Druckgefäß durch die Nähe der großen Massen von weichem Eisen geändert und vielleicht so vergrößert worden wäre, daß sie einen beträchtlichen Teil der Kapazität des Wismuts kompensierte. Es wurde daher eine der gemessenen Haspeln (Draht 6) außerhalb des Druckgefäßes an die Meßbrücke angeschlossen und mit ihr bei kleinerer und größerer Frequenz ein Versuch gemacht. Es ergab sich, daß der Wechselstrom-Gleichstromeffekt außerhalb des Druckgefäßes merklich derselbe war wie innerhalb desselben.

Wie schon bei den Angaben über die Anordnung der Brücke gesagt wurde, erwies sich der Rheostat von Edelmann nicht ganz frei von Selbstinduktion. Deshalb wurde es vermieden, die Widerstandsänderung beim Drücken durch Veränderung des Rheostatenwiderstandes zu kompensieren, vielmehr wurde die Einstellung lediglich durch Verschieben des Gleitkontaktes auf der Brücke hergestellt. Dadurch blieb eine etwaige Selbstinduktion in beiden Fällen ungeändert, und wenn sie auch fälschend auf die gemessene Größe der Kapazität des Wismutdrahtes wirkte, so konnte sie doch nicht den Sinn der durch Druck hervorgerufenen Kapazitätsänderung verkehrt erscheinen lassen.

Der Meßdraht der Brücke wurde mit einem Präzisionswiderstand von Wolff geeicht. Auf Grund dieser Eichung konnte eine Kurve in großem Maßstab angelegt werden, welche gestattete, unmittelbar das einer Brückeneinstellung entsprechende Widerstandsverhältnis der Zweige anzugeben.

10. Ergebnisse der Messungen.

Bevor nun zur Darstellung der einzelnen Versuchsergebnisse geschritten werden soll, sei dargelegt, wie sich die charakteristischen Größen des Wechselstrom-Gleichstromeffekts, die verhältnismäßige Änderung des Ohmschen Widerstandes für Wechselstrom und Gleichstrom

$$\Delta R = \frac{R_w - R_{gl}}{R_{gl}},$$

wo R_w den Wechselstrom-, R_{gl} den Gleichstromwiderstand bedeuten, und die Reaktanzwirkung des Wismutdrahtes aus den Beobachtungsdaten ergeben.

Es seien in der nachstehenden Fig. 17 R_1, R_2, R_3, R_4 die Ohmschen Widerstände, wobei sich R_3 und R_4 auf den Brückendraht nebst Ballastwiderständen beziehen, und R_1 durch die Widerstandssumme der hintereinandergeschalteten Manganinspule und der zusätzlichen Stücke des Edelmannrheostaten gegeben sein sollen. Es sei ferner C_1 die kompensierende Kapazität, wie sie sich aus der Summe der gestöpselten Werte des Glimmerkondensators und der Einstellung des Drehkondensators auf Grund einer für diesen aufgestellten Eichkurve ergibt und es sei TG das Telephon bzw. das Galvanometer.

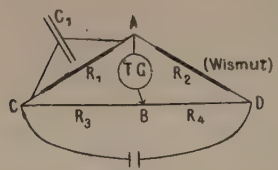


Fig. 17.

R_1 blieb, wie erwähnt, zwischen den einzelnen Gleichstrom- und Wechselstrommessungen eines Versuchs ungeändert, die Einstellung wurde vielmehr nur durch Verschieben des Gleitkontakts auf der Brücke hergestellt.

Dann ergibt sich, wenn der Zweig AB stromlos ist — der Ohmsche Widerstand in Zweig 2 ist immer proportional zu $\frac{R_4}{R_3}$ und die Zuleitungen aus dickem Kupferdraht können vernachlässigt werden — für ΔR der Ausdruck

$$\Delta R = \frac{\left(\frac{R_4}{R_3}\right)_w - \left(\frac{R_4}{R_3}\right)_{gl}}{\left(\frac{R_4}{R_3}\right)_{gl}}$$

wobei $\left(\frac{R_4}{R_3}\right)_w$ und $\left(\frac{R_4}{R_3}\right)_{gl}$ das Widerstandsverhältnis der Zweige 4 und 3 bei Einstellung mit Wechselstrom bzw. mit Gleichstrom bedeutet und aus der Eichkurve für die verschiedenen Stellungen des Gleitkontaktes bekannt ist. Eine einfache Überlegung zeigt, daß beim Schweigen des Telephons die Phasenverschiebung, die der Strom im Zweig des Wismutdrahtes erleidet, ebenso groß sein muß wie in dem aus dem Widerstand R_1 mit parallel geschaltetem Kondensator C_1 bestehenden Zweig 1.

Für diesen ist die Phasenverschiebung φ gegeben durch

$$\operatorname{tg} \varphi = \nu\, C_1\, R_1,$$

wenn ν die Frequenz (Periodenzahl in 2π Sek.) und C_1 und R_1 in gleichem Maß ausgedrückt sind, dabei eilt der Strom vor. Ebenso groß ist also auch die Phasenverschiebung im Wismutdraht.

In den beigefügten Tabellen ist die Größe ΔR in $^1/_{10000}$ des Widerstandes angegeben, R_1 in Ohm, C_1 in Mikrofarad.

Berücksichtigt man die Größe der gewählten Einheiten, so ergibt sich die Phasenverschiebung zu

$$\operatorname{tg} \varphi = 2\pi\, n\, R_1\, C_1 \cdot 10^{-6},$$

wobei n die Periodenzahl/Sek.

Die angegebenen Periodenzahlen sind die für die betreffende Schaltung der Sirene aus einer größeren Anzahl von Messungen bestimmten Mittelwerte.

Die Stellenzahl der mitgeteilten Werte entspricht den allgemeinen Regeln, wenn man die Genauigkeit betrachtet, mit welcher der Widerstand und die Kapazität für den einzelnen Versuch ermittelt wurden. Wegen der erwähnten Schwankungen des Magnetisierungsstromes und der Frequenz von einem Versuch zum andern kann die Unsicherheit jedoch in die vorletzte Stelle übergreifen, wenn man verschiedene Versuche aufeinander beziehen will. Obwohl sich das Hauptinteresse gerade an die Gegenüberstellung verschiedener Versuche unter Druck und ohne Druck knüpfte, wurde die Zahlen-

angabe nicht um eine Stelle gekürzt, weil der Druckeinfluß sich in einer Anzahl von Fällen in diesen unsicheren Stellen bewegte und durch die Angabe der Zahlen am besten die Bedeutung, welche der betreffenden Messung zu geben ist, festgelegt wird.

Nach einer längeren Reihe von Vorversuchen, welche schließlich zu der oben beschriebenen Anordnung führten, konnte eine größere Zahl von Messungen an der Wismuthaspel Nr. 6 aus Hartmann & Braunschem Draht von 0,15 mm Durchmesser gemacht werden. Die Haspel war schon zu den Gleichstrommessungen benutzt worden und bei diesen einem Druck bis 800 Atm. ausgesetzt gewesen. Wie schon angedeutet, wurde die Reaktanz des Wismutdrahtes anfangs durch einige Windungen Kupferdraht kompensiert. Es war dabei ein Übelstand, daß die Selbstinduktion proportional mit dem Quadrat der Windungszahl wächst, so daß, mit zunehmender Zahl von Windungen, der Zuwachs durch das Hinzutreten einer Windung und dementsprechend auch der etwaige Fehler, der dadurch entstand, daß man Eisendraht einführen mußte, um Zwischenwerte zu erhalten, ziemlich groß wurde. Es wurden daher auch auf der Seite des Rheostaten, in gehöriger

Tabelle X.*)

Draht 6.

Reaktanz mit Selbstinduktion kompensiert.

Beob. Nr.	n	H	$\Delta R \cdot 10^4$
21	1800	00	− 13,0
22	„	„	− 13,1
25	„	„	− 13,2
26	„	„	− 13,3
19	„	4200	+ 12,5
20	„	4650	+ 23,6
27	„	6200	+ 52,9
29	„	„	+ 52,4
30	„	„	+ 52,7
1	„	9100	+ 133,9
5	„	„	+ 132,0
11	3150	00	− 19,8
15	„	„	− 21,0
16	„	4150	+ 1,0
6	„	9100	+ 149,6
10	„	„	+ 142,7

*) n Periodenzahl/Sek. H Feldstärke in Gauss.

Entfernung von der ersten Selbstinduktion, einige Windungen Kupferdraht angeordnet. Das Hinzutreten einer Windung zu dieser kleineren Zahl bedingte eine kleinere Zunahme der Selbstinduktion, und die Verwendung des Eisendrahtes konnte so beschränkt werden.

Tabelle X gibt eine Zusammenstellung der ohne Druck gemachten Messungen, die für sich angeführt sein sollen, weil sie den betreffenden Wismutdraht in bezug auf den Wechselstrom-Gleichstromeffekt charakterisieren; die Versuche sind dabei nach Frequenz und Feldstärke geordnet.

Ähnlich dem, was frühere Beobachter für verschiedene Frequenzen gefunden hatten, zeigte sich außerhalb des Feldes ΔR negativ, wobei ein negatives ΔR bedeutet, daß der Wechselstromwiderstand kleiner als der Gleichstromwiderstand ist, und zwar nimmt mit Zunahme der Frequenz von 1800 Per/Sek. auf 3150 Per/Sek. auch der absolute Betrag der Differenz zu und wächst von 0,0013 zu 0,0020. Beachtet man, daß außerhalb des Feldes eine Zunahme des absoluten Betrages von ΔR mit der Frequenz bisher ganz allgemein gefunden wurde, so läßt dies erwarten, daß die vorliegende Haspel bei den von Schnorr von Carolsfeld[1]) gebrauchten Frequenzen ein noch kleineres ΔR zeigen würde als es für die von ihm untersuchten Drähte von Hartmann & Braun gefunden worden ist.

Im Magnetfeld wurde die bekannte Umkehr des Vorzeichens von ΔR und ein positives Wachsen mit zunehmender Feldstärke beobachtet. Dabei konnte auch im transversalen Feld eine wenn auch geringe Zunahme von ΔR mit der Frequenz beobachtet werden, indem im stärksten angewandten Feld von 9100 Gauss für 1800 Per/Sek. $\Delta R = 0{,}0130$,. für 3150 Per/Sek. $\Delta R = 0{,}0146$ gefunden wurde. Es ist dies in Übereinstimmung zu Schnorr von Carolsfeld. Aus einer graphischen Interpolation konnte entnommen werden, daß für die kleinere Frequenz Wechselstrom- und Gleichstromwiderstand bei einer Feldstärke von 3500 Gauss einander gleich werden, während dies für die größere Frequenz in einem Felde von 4100 Gauss eintrat.

Die Größe der Reaktanz ist an der Zahl der Windungen

---

1) E. Schnorr von Carolsfeld, l. c.

des die Selbstinduktion bildenden Kupferdrahtes nur ungenau zu bestimmen; es seien daher die Zahlen hier nicht angeführt. Soweit sich ihre Änderung in Abhängigkeit von Frequenz und Magnetisierungsstrom verfolgen ließ, erfolgte sie ähnlich wie bei den späteren Messungen mit Verwendung einer kompensierenden, dem Widerstand R_1 parallel geschalteten Kapazität.

Tabelle XI.*)

Draht 6.

Beob. Nr.	n	H	$\Delta R \cdot 10^4$	R_1 Ω	C_1 10^{-4} M.F.
89	1700	00	− 12,3	25,63	84,0
91	„	„	− 12,1	„	84,2
118	„	„	− 12,4	„	82,4
121	„	„	− 12,4	„	82,0
92	„	3500	− 1,5	28,13	95,4
94	„	„	− 0,4	„	95,2
95	„	5450	+ 30,4	30,63	76,8
97	„	„	+ 30,9	„	76,5
98	„	8600	+122,2	35,33	43,8
100	„	„	+120,7	„	47,9
113	„	„	+122,7	„	44,4
114	„	9200	+144,2	36,63	24,2
117	„	„	+137,1	„	29,5
101	3100	00	− 19,3	25,63	66,6
103	„	„	− 15,9	„	66,9
104	3400	„	− 21,2	25,63	60,8
106	„	„	− 21,7	„	59,6
107	„	5500	+ 22,2	30,63	62,7
109	„	„	+ 22,7	„	62,8
110	„	8600	+121,3	35,33	53,7
112	„	„	+117,4	„	54,7

*) R_1 Widerstand im Rheostatenzweig.
C_1 Kapazität parallel zu R_1.

Tabelle XI gibt eine Zusammenstellung dieser letzteren Messungen, die mit derselben Haspel ohne Druck gemacht wurden. Man erkennt, daß die Änderungen von ΔR in Abhängigkeit von Frequenz und Feldstärke in gleicher Weise erfolgen, wie bei den früheren Beobachtungen mit kompensierender Selbstinduktion, so daß es nicht nötig scheint, die Einzelheiten nochmals hervorzuheben. Durch graphische Interpolation wurde die Gleichheit des Gleichstrom- und Wechselstromwiderstandes für 1700 Per/Sek. bei der Feldstärke 3550 Gauss, für 3400 Per/Sek. bei der Feldstärke

4200 Gauss gefunden. Wie schon erwähnt, ist die parallel zu R_1 geschaltete Kapazität ein Maß für die Voreilung des Stromes gegen die elektromotorische Kraft im Wismutdraht durch die Beziehung

$$\operatorname{tg} \varphi = \nu C_1 R_1.$$

Verfolgen wir die Änderung der Kapazität, so sehen wir, daß sie außerhalb des Feldes mit zunehmender Frequenz abnimmt, während sie für ein und dieselbe Frequenz in schwachen Feldern eine Vergrößerung, in starken eine beschleunigte Abnahme erfährt. Für die Phasenverschiebung finden wir so außerhalb des Feldes von 1700 Per/Sek. auf 3100 Per/Sek. eine Zunahme und für die kleine Frequenz (bei der bis zu größeren Feldstärken gemessen wurde) zunächst eine Zunahme, dann eine starke Abnahme nach wachsenden Feldern.

Die Ergebnisse der Versuche über die Änderung, welche die besprochenen Erscheinungen durch Druck erleiden, sind in den Tabellen XII und XIII zusammengestellt. Die erstere

Tabelle XII.*)

Draht 6.

Reaktanz mit Selbstinduktion kompensiert.

Beob. Nr.	n	H	p	$\Delta R_p \cdot 10^4$	$\Delta R_0 \cdot 10^4$	$\lvert\Delta R_p\rvert - \lvert\Delta R_0\rvert \cdot 10^4$
23	1800	00	576	+ 13,25	+ 13,15	+ 0,1
24	„	„	574	+ 13,15	+ 13,15	0,0
18	„	4200	568	+ 14,0	+ 12,5	+ 1,5
28	„	6200	572	+ 56,4	+ 52,7	+ 3,7
2	„	9100	40	+133,1	+133,1	+ 0,1
3	„	„	194	+134,6	+132,9	+ 1,7
4	„	„	582	+140,1	+132,8	+ 7,3
12	3150	00	40	− 22,0	− 20,4	+ 1,6
13	„	„	192	− 22,9	− 20,4	+ 2,5
14	„	„	580	− 22,5	− 20,4	+ 1,9
17	„	4150	570	+ 3,8	+ 1,0	+ 2,8
7	„	9100	395	+145,7	+147,6	− 1,9
8	„	00	193	+147,7	+146,2	+ 2,0
9	„	„	580	+148,5	+148,6	+ 3,2

*) p Druck in Atmosphären.

Die Werte des Druckversuches sind mit dem Index p, die entsprechenden Werte ohne Druck mit dem Index 0 bezeichnet.

Tabelle XIII.

Draht 6.

Beob.-Nr.	n	H	p	$\Delta R_p \cdot 10^4$	$\Delta R_0 \cdot 10^4$	$\lvert\Delta R_p\rvert - \lvert\Delta R_0\rvert \cdot 10^4$	R_1 Ω	C_{1p} 10^{-4} M.F.	C_{10} 10^{-4} M.F.	$C_{1p} - C_{10}$ 10^{-4} M.F.
90	1700	00	574	− 12,3	− 12,2	+0,1	25,63	89,6	84,1	+ 5,4
119	„	„	98	− 12,8	− 12,4	+0,4	„	83,3	82,3	+ 1,0
120	„	„	581	− 13,3	− 12,4	+0,9	„	85,1	82,1	+ 3,6
93	„	3500	577	+ 1,9	− 1,0	+0,9	28,13	91,2	95,3	− 4,1
96	„	5450	577	+ 33,4	+ 30,7	+2,7	30,63	66,5	76,7	− 10,2
99	„	8600	577	+129,5	+121,4	+8,1	35,33	22,5	45,8	− 23,0
113	„	9200	99	+144,1	+141,9	+2,2	36,63	19,6	26,0	− 6,4
116	„	„	581	+147,9	+139,8	+8,1	„	−(4,3)	+27,8	− 32,1
102	3100	00	580	− 18,6	− 17,6	+1,0	25,63	72,1	66,7	+ 5,4
105	3400	„	573	− 21,9	− 21,4	+0,4	„	63,2	60,2	+ 3,0
108	„	5500	575	+ 25,5	+ 22,4	+3,1	30,63	62,0	62,7	− 0,7
111	„	8600	577	+125,7	+119,3	+5,4	35,33	51,0	54,2	− 3,2

bezieht sich auf die Beobachtungen, die mit Selbstinduktionen gemacht wurden; die letztere auf diejenigen, bei welchen eine Kapazität zugeschaltet war.

Um die Änderung von ΔR durch Einwirkung des Druckes darzustellen, ist neben dem Wert unter Druck (ΔR_p) der

Tabelle XIV.

Draht 6.

n	H	p	$\lvert\Delta R_p\rvert - \lvert\Delta R_0\rvert \cdot 10^4$	R_1 Ω	C_{1p} 10^{-4} M.F.	$C_{1p} - C_{10}$ 10^{-4} M.F.
1700	00	− 12,3	+ 0,5	25,63	83,1	+ 4,5
„	3500	+ 1,9	+ 0,9	28,13	91,2	− 4,1
„	5450	+ 33,4	+ 2,7	30,63	66,5	− 10,2
„	8600	+129,5	+ 8,1	35,33	22,8	− 23,0
„	9200	+147,9	+ 8,1	36,63	−(4,3)	− 32,1
3100	00	− 18,6	+ 1,0	25,63	72,1	+ 5,4
3400	00	− 21,9	+ 0,4	25,63	63,2	+ 3,0
„	5500	+ 25,5	+ 3,1	30,63	62,0	− 0,7
„	8600	+125,7	+ 5,4	35,33	51,0	− 3,2

betreffende Wert ohne Druck (ΔR_0) eingetragen, wie er durch Mittelbildung aus einem vorangehenden und nachfolgenden Versuch gefunden wurde und in der nächsten Kolonne die Differenz $\Delta R_p - \Delta R_0$, und zwar positiv, wenn der Wert unter Druck absolut größer ist. Die vorstehende Tabelle XIV zeigt die Einwirkung stärkeren Druckes (Kompression auf 600 Atm.), wobei aus gleichartigen Beobachtungen die Mittelwerte genommen sind.

Man sieht, daß für die Messungen unter einem Druck von etwa 580 Atm. die Größe ΔR unter Druck stets absolut größer gefunden wird. Außerhalb des Feldes und für starke Felder beträgt die relative Zunahme der Größenordnung nach etwa 5 Proz., sie scheint jedoch von der Größe von ΔR nicht direkt abzuhängen und erlangt dementsprechend in schwachen Feldern, für welche ΔR klein ist, verhältnismäßig höhere Werte. Die Beobachtungen lassen sich auch so auffassen, als ob die Einwirkung des Druckes dahin ginge, außerhalb des Feldes den Wechselstromwiderstand zu verkleinern, im Feld die Wirkung des Feldes zu verstärken.

Die Veränderung von ΔR durch Druck war so klein, daß es nicht gelang, ihre Abhängigkeit von der Größe des Druckes genauer zu formulieren. Die Beobachtungen 2, 3 und 4, 8 und 9 in Tabelle XII und 119 und 120 sowie 113 und 116 in Tabelle XIII lassen nur allgemein eine Zunahme des Einflusses mit dem Druck zwischen 98 und 580 Atm. erkennen.

Die Änderung der Reaktanz läßt sich wieder nur genau bei den Messungen, die mit einer Kapazität gemacht sind, verfolgen. Da beim Vergleich mit Messungen ohne Druck von den drei die Phasenverschiebung bedingenden Faktoren nur die Kapazität verändert wurde, so genügt es, deren Änderung zu verfolgen, um ein Bild von der durch Druck hervorgebrachten Änderung der Phasenverschiebung im Wismutdraht zu gewinnen. In Tabelle XIII ist wieder die kompensierende Kapazität bei der Messung unter Druck (C_{1p}) und das Mittel aus analogen Versuchen ohne Druck (C_{1o}) eingetragen und daneben die Differenz der beiden Werte. Es ergibt sich so, daß der Druck die Phasenverschiebung außerhalb des Magnetfeldes für jede Frequenz vergrößert, und zwar um etwa 7 Proz. für 580 Atm.; im transversalen Feld jedoch sie progressiv verkleinert, und zwar in besonderem Maße für die Frequenz von

1700 Per/Sek. Da mit stärkeren Feldern zunächst eine Verminderung der Kapazitanzwirkung des Wismutdrahtes, sodann eine Induktanzwirkung beobachtet wird, so kann man sagen, daß der allseitige Druck die Wirkung des Magnetfeldes unterstützt. Dem entspricht Versuch 116 in Tabelle XIII, bei dem in einem Feld von 9200 Gauss die kompensierende Kapazität bei einem Druck von 581 Atm. in den Zweig des Wismutdrahtes diesem parallel geschaltet werden mußte, um das Telephon zum Schweigen zu bringen, was durch die Klammer und ein —Zeichen bei der Kapazität angedeutet ist, während unter denselben Bedingungen ohne Druck die Kapazität, wie außerhalb des Feldes und in schwachen Feldern, dem Rheostaten R_1 parallel geschaltet war. Was die Abhängigkeit der Änderung von der Größe des Druckes anlangt, so mußte man sich auch hier beschränken, das Parallelgehen beider zu konstatieren.

Tabelle XV.

Draht 6.

Beob. Nr.	n	H	Unter Druck		Ohne Druck		Änderung d. Kapazitanz durch Druck
			Selbstind. auf Seite des Rheostaten R_1	Selbstind. auf Seite des Bi	Selbstind. auf Seite des Rheostaten R_1	Selbstind. auf Seite des Bi	
21—25	1700	00	$2\,w$	$7\,w+8\,D$	$2\,w$	$7\,w$	Zunahme
27—28	„	6200	$3w+28\,D$	$8\,w$	3 „	$8\,w+19\,D$	Abnahme
4— 5	„	9100	$5\,w$	7 „	2 „	$7\,w$	„
9—10	3100	„	2 „	$7\,w$ + wenig D	2 „	$7w$ + viel D	„

Um die qualitative Seite der Kapazitanzänderung auch bei der Kompensation mit Selbstinduktionen zu zeigen, seien in Tabelle XV einige Versuche zusammengestellt, bei denen auf genaue Kompensation besonders sorgfältig geachtet wurde. Es ist dabei die in den Zweig R_1 und in den Zweig des Wismutdrahtes geschaltete Selbstinduktion durch die Windungszahl (w) und durch die Anzahl der eingeführten Eisendrähte (D) charakterisiert.

Um zu erkennen, wieweit die bei dem dünnen Wismutdraht beobachtete Druckeinwirkung von der Dicke des Drahtes abhängen möge, wurde ein von Hartmann & Braun zu einer

Spirale gebogener Draht von 0,25 mm Durchmesser (Draht Nr. 7), der auch schon zu Gleichstrommessungen gebraucht worden war, untersucht.

Tabelle XVI.

Draht 7 (Spirale).

Beob. Nr.	n	H	$\Delta R \cdot 10^4$	R_1 Ω	C_1 10^{-4} M.F.
33	1700	00	− 16,4	21,23	46,0
41	„	4500	+ 16,3	24,73	72,5
42	„	6150	+107,3	28,73	39,5
36	3100	00	− 20,0	21,23	33,0
37	„	4500	+ 11,8	24,73	64,0
45	„	6150	+ 99,8	28,73	51,0

Tabelle XVI enthält die Messungen ohne Druck. Die Größenordnung von ΔR, die Kapazitanz und die Phasenverschiebung und deren Abhängigkeit von Frequenz und Magnetisierungsstrom entsprechen den Messungen mit Draht Nr. 6.

Für die Druckmessungen war es nachteilig, daß der Draht in eine Schicht Fischleim eingebettet war, was, wie schon bei den Gleichstrommessungen erwähnt wurde, wegen des langsameren Ausgleichs der Kompressionswärme dazu zwang, eine längere Zeit zwischen der Druckänderung und dem Beginn der Messungen verstreichen zu lassen. Es war so die Konstanz der Tourenzahl der Sirene und des Magnetisierungsstromes noch weniger verbürgt, und es wurde deshalb ganz davon abgesehen, die Versuche auf stärkere Felder auszudehnen.

Tabelle XVII.

Draht 7 (Spirale).

Beob.-Nr.	n	H	p	$\Delta R_p \cdot 10^4$	$\Delta R_0 \cdot 10^4$	$\lvert\Delta R_p\rvert - \lvert\Delta R_0\rvert \cdot 10^4$	R_1 Ω	C_{1p} 10^{-4} M.F.	C_{10} 10^{-4} M.F.	$C_{1p} - C_{10}$ 10^{-4} M.F.
34	1700	00	479	− 12,0	− 16,4	+ 0,6	21,43	49,5	46,0	+ 3,5
39	„	4500	475	+ 18,1	+ 16,3	+ 1,8	24,93	78,0	72,5	+ 5,5
40	„	„	476	+ 18,3	− 16,3	+ 2,0	24,93	78,0	72,5	+ 5,5
43	„	6150	478	+111,7	+107,3	+ 4,4	28,93	45,0	39,5	+ 5,5
35	3100	00	478	− 20,9	− 20,0	+ 0,9	21,43	32,5	33,0	− 0,5
38	„	4500	478	+ 12,2	+ 11,8	+ 0,4	24,93	68,5	64,0	+ 4,5
44	„	6150	477	+112,1	+ 99,8	+12,3	28,93	50,0	51,0	− 1,0

Tabelle XVII enthält die Ergebnisse der Druckversuche. In bezug auf ΔR findet sich eine Bestätigung des bei Haspel 6 hervorgehobenen Verhaltens, hingegen ließ sich die Kapazität nicht genügend genau bestimmen, um die Änderung, die sich aus der Gegenüberstellung der unter Druck und ohne Druck beobachteten Werte ergibt, als sichergestellt betrachten zu können. Dementsprechend ist in Tabelle XVIII, welche eine Zusammenstellung der Mittelwerte für 500 Atm. Anfangsdruck enthält, nur die Änderung von ΔR dargestellt.

Tabelle XVIII. Draht 7 (Spirale).

n	H	p	$\lvert\Delta R_p\rvert - \lvert\Delta R_0\rvert \cdot 10^4$	R_1 Ω
1700	00	− 17,0	+ 0,6	21,43
„	4500	+ 18,2	+ 1,9	24,93
„	6150	+111,7	+ 4,4	28,93
3100	00	− 20,9	+ 0,9	21,43
„	4500	+ 12,2	+ 0,4	24,93
„	6150	+112,1	+12,3	28,93

Tabelle XIX. Draht 5.

Beob. Nr.	n	H	$\Delta R \cdot 10^4$	R_1 Ω	C_1 10^{-4} M.F.
46	1700	00	− 22,9	16,28	103,2
51	„	„	− 22,9	„	96,1
67	„	„	− 22,4	„	114,2
69	„	„	− 21,9	„	118,1
70	„	2200	− 18,3	17,08	120,3
72	„	„	− 17,9	„	120,7
73	„	3400	− 7,8	17,98	138,9
75	„	„	− 7,4	„	138,7
76	„	4150	+ 2,0	18,48	137,6
77	„	4650	+ 11,9	18,88	144,2
79	„	„	+ 12,0	„	144,2
52	„	5500	+ 32,5	19,68	125,2
62	„	8600	+149,2	22,78	95,6
63	„	„	+150,6	„	95,1
66	„	„	+141,9	„	99,0
80	„	9200	+170,2	23,38	100,3
82	„	„	+167,0	„	100,3
55	3100	00	− 28,6	16,28	64,5
58	„	8600	+133,0	22,78	82,1
61	„	„	+127,6	„	82,4
83	„	9200	+159,2	23,48	87,3
85	„	„	+156,7	„	87,1

Tabelle XX.

Draht 5.

Beob. Nr.	n	H	p	$\Delta R_p \cdot 10^4$	$\Delta R_0 \cdot 10^4$	$\Delta R_p - \Delta R_0 \cdot 10^4$	R_1 Ω	C_{1p} 10^{-4} M.F.	C_{10} 10^{-4} M.F.	$C_{1p} - C_{10}$ 10^{-4} M.F.
47	1700	00	39	− 22,5	− 22,9	−0,4	16,28	107,1	101,9	+ 5,2
48	„	„	98	− 22,7	− 22,9	−0,2	„	110,0	100,4	+ 9,8
119	„	„	200	− 23,2	− 22,9	+0,3	„	110,0	99,0	+11,1
50	„	„	580	− 23,7	− 22,9	+0,8	„	118,6	97,8	+20,8
68	„	„	577	− 21,3	− 22,1	−0,8	„	124,4	116,1	+ 8,3
71	„	2200	577	− 18,1	− 18,1	0,0	17,08	127,6	120,5	+ 7,3
74	„	3400	577	− 7,3	− 7,6	−0,3	17,98	147,1	138,8	+ 8,4
78	„	4650	578	+ 13,1	+ 11,9	+1,2	18,88	155,6	144,2	+11,4
53	„	5500	98	+ 32,4	+ 32,5	−0,1	19,68	127,6	125,2	+12,1
54	„	„	592	+ 31,9	+ 32,5	−0,6	„	121,0	125,2	− 4,2
64	„	8600	98	+150,9	+147,2	+3,7	22,78	96,1	96,2	− 1,0
65	„	„	594	+151,8	+146,1	+5,7	„	100,5	97,5	+ 3,0
81	„	9200	577	+174,7	+168,7	+6,0	23,38	104,2	102,0	+ 2,2
56	3100	00	98	− 30,7	− 28,6	+2,1	16,28	67,1	65,0	+ 2,1
57	„	„	578	− 31,1	− 28,6	+2,5	„	74,2	65,0	+ 9,2
59	„	8600	99	+131,8	+130,9	+0,9	22,78	80,5	82,2	− 1,7
60	„	„	581	+137,7	+129,7	+8,0	„	79,1	82,3	− 3,2
84	„	9200	570	+167,3	+157,8	+9,5	23,48	81,6	87,2	− 5,6

Da sich die Spirale zu genaueren Messungen nicht geeignet erwies, wurde Haspel Nr. 5 aus Hartmann & Braunschem Draht, welcher auch 0,25 mm Durchmesser hatte, gemessen. Es seien zunächst die Messungen ohne Druck in Tabelle XIX wiedergegeben.

Man erkennt, daß ΔR sowohl außerhalb des Feldes, dem absoluten Betrag nach, als innerhalb des Feldes größer ist als bei Haspel Nr. 6, während die Phasenverschiebung in beiden ungefähr dieselbe Größe erreicht; im übrigen ist auch hier das Verhalten ganz analog wie bei den schon besprochenen Drähten.

Tabelle XX enthält die Druckmessungen und Tabelle XXI wieder eine Zusammenstellung der Mittelwerte für 600 Atm. Anfangsdruck.

Tabelle XXI.

Draht 5.

n	H	$\Delta R_p \cdot 10^4$	$\lvert\Delta R_p\rvert - \lvert\Delta R_0\rvert \cdot 10^4$	R_1 Ω	C_{1p} 10^{-4} M.F.	$C_{1p} - C_{10}$ 10^{-4} M.F.
1700	00	22,5	0,0	16,28	121,5	+ 14,5
„	2200	− 18,1	0,0	17,08	127,6	+ 7,1
„	3400	− 7,3	− 0,3	17,98	147,1	+ 8,3
„	4650	+ 13,1	+ 1,2	18,88	155,6	+ 11,4
„	5500	+ 31,9	− 0,6	19,68	125,2	− 4,2
„	8600	+151,8	+ 5,7	22,78	100,5	+ 3,0
„	9200	+174,7	+ 6,0	23,38	104,2	+ 2,2
3100	00	− 31,1	+ 2,5	16,28	74,2	+ 9,2
„	8600	+137,7	+ 8,0	22,78	79,1	− 3,2
„	9200	+167,3	+ 9,5	23,48	81,6	− 5,6

Für die Frequenz 3100 Per/Sek. erfolgen die Änderungen von ΔR und C ganz ähnlich, wie wir es bei den zuerst besprochenen Drähten Nr. 6 und 7 gesehen haben; hingegen sind die Ergebnisse für die Frequenz 1700 Per/Sek. unsicher, indem die Beobachtungsfehler (wegen Veränderung der Frequenz) die Effekte verdecken. Wenigstens ist dies für $\lvert\Delta R_p\rvert - \lvert\Delta R_0\rvert$ außerhalb des Feldes und in schwachen Feldern der Fall; ohne Magnetfeld wurde diese Differenz ja auch bei Haspel 6 kleiner als $1 \cdot 10^{-4}$ des Widerstandes gefunden. In bezug auf die Kapazität zeigte sich außerhalb des Feldes und in schwachen Feldern eine Zunahme der Kapazität mit dem Druck; für die größere Frequenz und für stärkere Felder eine Abnahme.

Die besonders bei 1700 Per/Sek. störenden Frequenzänderungen waren, wie sich später herausstellte, bei diesen Versuchen so stark, weil die Kohlenbürsten des Kollektors der Belastungsmaschine bei längerem Betrieb warm wurden und wegen des dadurch verschlechterten Kontakts die Belastung der Sirene sich änderte. Zur Verringerung dieses Übelstandes wurde bei den späteren Versuchen der Kollektor mit einem Ventilator kräftig gekühlt.

Um zu erkennen, wie weit die Art der Einwirkung des Druckes von den speziellen Eigenschaften des Wismutdrahtes abhing, wurde die ebenfalls zu Gleichstromversuchen schon

benutzte Haspel 4 aus Draht von 0,35 mm Durchmesser, welche im Institut durch Pressen aus Kahlbaumschem Wismut hergestellt war, gemessen. Es ist schon darauf hingewiesen worden, daß die Brücke für die Ausmessung dieses Drahtes von 8,2 Ω Widerstand etwas weniger empfindlich war; dies konnte dadurch nahezu ausgeglichen werden, daß es zulässig schien, bei dem dickeren Draht die Stromstärke zu erhöhen, wodurch die Einstellungsschärfe gewann.

Tabelle XXII.

Draht 4 (Kahlbaum).

Beob. Nr.	n	H	$\Delta R \cdot 10^4$	R_1 Ω	C_1 10^{-4} M.F.
122	1700	00	− 46,4	8,2	330,6
144	„	„	− 45,6	„	320,0
146	„	„	− 46,0	„	320,0
126	„	3550	− 40,8	8,8	414,1
128	„	„	− 40,1	„	422,0
129	„	5400	− 21,7	9,6	403,2
131	„	„	− 21,9	„	402,2
132	„	8600	+ 49,6	11,0	320,0
134	„	„	+ 45,6	„	325,2
147	„	9300	+ 75,5	11,3	370,0
149	„	„	+ 70,5	„	370,0
135	3400	00	− 56,4	8,2	190,0
139	„	5400	− 33,8	9,6	240,0
140	„	8600	+ 1,0	11,0	170,0
143	„	9050	+ 46,8	11,3	150,0

Tabelle XXII gibt die Ergebnisse der Messungen ohne Druck. Wir finden hier für ΔR qualitativ dieselbe Abhängigkeit von Frequenz und Magnetisierungsstrom, wie sie bei den früher untersuchten Drähten hervorgehoben wurde. Dagegen ist der Betrag von ΔR außerhalb wie innerhalb des Feldes wesentlich größer und es ist die Feldstärke, bei welcher Gleichstrom- und Wechselstromwiderstand einander gleich sind, nach einem höheren Wert verschoben. Eine graphische Interpolation gibt für die Frequenz 1700 Per/Sek. hierfür die Feldstärke 5500 Gauss, für die Frequenz 3400 Per/Sek. 6300 Gauss.

Tabelle XXIII enthält die Ergebnisse der Druckmessungen, Tabelle XXIV gibt die Zusammenstellung der Mittelwerte der Versuche, bei denen auf 600 Atm. komprimiert wurde.

Was die Einwirkung des Druckes auf die kompensierende Kapazität anlangt, so entspricht sie im allgemeinen dem bei Haspel Nr. 6 gefundenen Verhalten.

Tabelle XXIII.

Draht 4 (Kahlbaum).

Beob. Nr.	n	H	p	ΔR_p $\cdot 10^4$	ΔR_0 $\cdot 10^4$	$\lvert\Delta R_p\rvert - \lvert\Delta R_0\rvert$ $\cdot 10^4$	R_1 Ω	C_{1p} 10^{-4} M. F.	C_{10} 10^{-4} M. F.	$C_{1p} - C_{10}$ 10^{-4} M. F.
123	1700	00	98	− 46,3	− 46,4	− 0,1	8,2	327,1	330,0	− 2,9
124	„	„	290	− 47,2	− 46,4	+ 0,8	„	326,3	330,0	− 3,7
125	„	„	564	− 47,8	− 46,4	+ 1,4	„	333,7	330,0	+ 3,7
145	„	„	560	− 47,2	− 45,8	+ 1,4	„	340,0	320,0	+ 20,0
127	„	3550	561	− 42,3	− 40,4	+ 1,9	8,8	422,0	418,0	+ 4,0
130	„	5400	577	− 18,8	− 21,8	− 3,0	9,6	394,2	402,7	− 8,5
133	„	8600	566	+ 54,8	+ 47,6	+ 7,2	11,0	289,0	323,0	− 34,0
148	„	9300	562	+ 82,5	+ 73,0	+ 8,5	11,3	333,2	370,0	− 36,8
136	3400	00	561	− 57,3	− 56,4	+ 0,9	8,2	194,2	190,0	+ 4,2
138		5400	564	− 31,7	− 33,8	− 2,1	9,6	250,0	240,0	+ 10,0
141		8600	544	+ 38,7	+ 31,0	+ 7,7	11,0	150,0	170,0	− 20,0
142	„	9050	589	+ 51,6	+ 46,8	+ 4,8	11,3	160,0	150,0	+ 10,0

Tabelle XXIV.

Draht 4 (Kahlbaum).

n	H	ΔR_p $\cdot 10^4$	$\lvert\Delta R_p\rvert - \lvert\Delta R_0\rvert$ $\cdot 10^4$	R_1 Ω	C_{1p} 10^{-4} M.F.	$C_{1p} - C_{10}$ 10^{-4} M.F.
1700	00	− 47,5	+ 1,4	8,2	336,8	+ 11,8
„	3550	− 42,3	+ 1,9	8,8	422,0	+ 4,0
„	5400	− 18,8	− 3,0	9,6	394,2	− 8,5
„	8600	+ 54,8	+ 7,2	11,0	289,0	− 34.0
„	9300	+ 82,5	+ 8,5	11,3	333,2	− 36,8
3400	00	− 57,3	+ 0,9	8,2	194,2	+ 4,2
„	5400	− 31,7	− 2,1	9,6	250,0	+ 10,0
„	8600	+ 38,7	+ 7,7	11,0	150,0	− 20,0
„	9050	+ 51,6	+ 4,8	11,3	160,0	+ 10,0

In bezug auf ΔR tritt jedoch eine Ausnahme für die Feldstärke 5400 Gauss (Beobachtungen 130 und 138) ein, indem der Druck das bei dieser Feldstärke noch negative ΔR absolut verkleinert. Die Größe der gemessenen Einwirkung ist so, daß sie unter Annahme von zwei sehr starken Frequenzschwankungen der Sirene gerade noch auf einen Beobachtungsfehler zurückgeführt werden könnte; es erscheint jedoch wahr-

scheinlicher, daß man dies als eine Bestätigung der bei der Einwirkung des Druckes auf die Kapazität bei Betrachtung von Haspel Nr. 6 angedeuteten Annahme anzusehen hat, daß der Druck im Magnetfeld die Wirkung desselben verstärkt; diese würde ja auch dahin gehen, das negative ΔR absolut zu verkleinern.

11. Beziehung der Ergebnisse zu anderweitigen Untersuchungen.

Was eine Deutung obiger Ergebnisse in bezug auf den Gleichstrom-Wechselstromeffekt anlangt, so liegt es, wie eingangs erwähnt wurde, zunächst nahe, an einige neuere Vorstellungen anzuknüpfen, welche den Spaltungsflächen des Wismuts eine wesentliche Bedeutung beilegen.

Es seien daher in Hinblick auf sie die Haupterscheinungen kurz zusammengefaßt, ohne Anspruch auf Vollständigkeit machen zu können. Eingehende Darstellungen finden sich in den zitierten Arbeiten von Schnorr von Carolsfeld, Seidler und Geipel. Es sei hier der Hinweis gestattet, daß die Verschiedenheit der Ergebnisse einiger älterer Untersuchungen ihren Grund in der starken Abhängigkeit der Effekte von der Frequenz und Form des Wechselstroms haben dürfte, so daß eine Quelle von Abweichungen stets vorliegt, wenn nicht der verwendete Wechselstrom durch seine Entstehung eine wohlbestimmte Frequenz hat und sinusförmig ist, oder das beobachtende Instrument nur auf eine bestimmte Frequenz reagiert und diese herausgreift. Ferner hängen die Erscheinungen sehr stark von der Struktur der Drähte ab, so zwar, daß ein nachträgliches Biegen genügt, um sie zu beeinflussen.

Allgemein wird gefunden, daß ein Wismutdraht für Wechselstrom einen anderen Widerstand hat als für Gleichstrom.[1]) Außerhalb des Magnetfeldes ist der Wechselstromwiderstand kleiner, und die Differenz ΔR nimmt mit der Frequenz zu. Im longitudinalen Feld wird der außerhalb des Feldes beobachtete Effekt verstärkt. Im starken transversalen Feld ist der Ohmsche Wechselstromwiderstand größer als der Gleichstromwiderstand, und die Differenz wächst rasch mit der Feldstärke. Bei etwa 4500 Gauß sind die Widerstände ein-

1) P. Lenard l. c.; G. H. Zahn l. c.; B. Wolff, Diss. Würzburg 1897; R. Wachsmut u. K. Bamberger, Physik. Zeitschr. 1. p. 127. 1899; K. Bamberger, Diss. Berlin 1901; E. Schnorr von Carolsfeld l. c. u. a.

ander gleich. Außerdem wird eine Phasenverschiebung zwischen Strom und elektromotorischer Kraft beobachtet, und zwar eilt der Strom außerhalb des Magnetfeldes vor (Leiter mit Kapazität); im starken transversalen Feld eilt der Strom nach (Leiter mit Selbstinduktion). Die Phasenverschiebung verschwindet in der Regel bei einer größeren Feldstärke wie ΔR.

Bei stark ausgeprägter kristallinischer Struktur sind die Effekte größer, besonders die außerhalb des Magnetfeldes beobachteten. Sie verschwinden beim flüssigen Metall. Verunreinigungen hingegen haben wenig Einfluß.

Mit einem Momentkontakt wurde die Beziehung zwischen der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke in den einzelnen Abschnitten einer Periode des Wechselstroms untersucht.[1]) Es zeigte sich, daß im starken Magnetfeld der Widerstand des Wismuts bei Stromanstieg am größten, bei Stromabfall am kleinsten ist.

Eine Erweiterung der Beobachtungen mit Benutzung eines Helmholtzschen Fallpendels ergab[2]): Außerhalb des Feldes findet Energieaufnahme bei ansteigendem Strom, Abgabe bei Stromabfall statt. Im transversalen Feld ist der Effekt von entgegengesetztem Sinn und viel größer.

Bei der Fortsetzung dieser Untersuchungen fand Seidler[3]) außerhalb des Feldes eine Nachwirkung, indem nach Aufhören eines Stromes eine elektromotorische Kraft von der Richtung des primär im Wismutdraht geflossenen Stromes zurückbleibt, die einen Kurzschluß der Drahtenden überdauert. Im longitudinalen Magnetfeld wird diese Nachwirkung verstärkt.

Im starken transversalen Feld tritt eine zweite, langsamer abklingende Nachwirkung auf, die entgegengesetzt gerichtet ist und sich der ersten überlagert. Die erstere hängt mit der Struktur der Drähte eng zusammen; sie ist stärker und klingt rascher ab bei ausgesprochen kristallinischer Struktur. Bei der letzteren ist dies nicht deutlich zu erkennen.[4])

---

1) A. Sadowsky, Journ. d. russ. phys.-chem. Ges. **25.** p. 295. 1893; **26.** p. 81. 1894; Phil. Mag. (5) **39.** p. 377. 1895; A. Griffiths, Phil. Mag. (5) **39.** p. 229. 1895; G. C. Simpson, Phil. Mag. (6) **2.** p. 300. 1901 und (6) **4.** p. 554. 1902.

2) P. Pallme-König, Diss. Leipzig 1907, Ann. d. Phys. **25.** p. 921. 1908.

3) R. Seidler l. c.

4) J. Geipel l. c.

Die beiden Nachwirkungen wurden von Geipel auch in Antimon und Tellur beobachtet; der Wechselstrom-Gleichstromeffekt findet sich bei diesen Metallen insofern, als der Wechselstromwiderstand kleiner als der Gleichstromwiderstand gefunden wird.

Um zu den erklärenden Vorstellungen zurückzukehren, so hat Schnorr von Carolsfeld darauf hingewiesen, daß der Wechselstrom-Gleichstromeffekt außerhalb des Magnetfeldes formal dem Verhalten einer elektrolytischen Zelle mit Depolarisation nach M. Wien entspricht.

In den Arbeiten von Seidler und Geipel wird hauptsächlich nach einer Erklärung der Nachwirkung gesucht.

Die im transversalen Magnetfeld auftretende, von Seidler „Transversaleffekt" genannte Nachwirkung soll mit dem Halleffekt zusammenhängen, hingegen wird die außerhalb des Magnetfeldes beobachtete, die bei Drähten mit stark ausgeprägter Struktur größer ist, speziell auf die Spaltflächen des Wismuts zurückgeführt. Es wird als wahrscheinlich angenommen, daß sich in ihnen eine Gasschicht befindet, die beim Durchgang des Stromes polarisiert und so Ursache der Nachwirkung sein würde.

Der Wechselstrom-Gleichstromeffekt außerhalb und innerhalb des Magnetfeldes soll sich nach Geipel unmittelbar auf Grund der beiden Nachwirkungen ergeben.[1])

Hierbei zeigt sich zunächst eine gewisse Schwierigkeit in der Tatsache, daß auch das in stärkeren transversalen Feldern positive ΔR größer gefunden wird, wenn die Struktur besonders stark ausgeprägt ist, während sie auf den Transversaleffekt ohne Einfluß ist, und daß für Drähte von Hartmann & Braun der Vorzeichenwechsel von ΔR bei einer Feldstärke von etwa 4500 Gauß stattfindet, während für solche Drähte noch bei 8000 Gauß die außerhalb des Feldes bestehende Nachwirkung in den in Betracht kommenden Zeiten in ihrem Integralwert allein zur Geltung kommt.

Vielleicht könnte man jedoch die Struktur des Wismuts, die ja an dem Zustandekommen des Wechselstrom-Gleichstromeffekts sicherlich beteiligt ist, und auch speziell die Wirkung der Spaltflächen noch in etwas anderer Weise betrachten.

Nimmt man an, daß in einem Teil von ihnen nur ver-

1) J. Geipel l. c. p. 10 u. p. 106f.

schwindende Leitung stattfindet, wobei es zunächst unwesentlich ist, ob ein besonderes Dielektrikum (Gas- oder Oxydschichten) vorhanden ist oder nicht, so wirkt dieses Gefüge von Spaltflächen wie eine große Zahl parallel und hintereinander geschalteter Kondensatoren.

In erster Annäherung entspricht dann einem Wismutdraht ein Widerstand R, zu dem eine Kapazität C mit dahintergeschaltetem Widerstand r parallel geschaltet ist, wobei R im wesentlichen den Gleichstromwiderstand, r den Ausbreitungswiderstand in den Kondensatorflächen darstellt.

Für ein solches wechselstromdurchflossenes Leitersystem ergibt sich eine Phasenverschiebung

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{R}{\nu C(rR + r^2) + \frac{1}{\nu C}} \qquad (1)$$

wobei der Strom voreilt, und ein für die Brückeneinstellung maßgebender Widerstand

$$R' = R\frac{r^2 + \frac{1}{\nu^2 C^2}}{Rr + r^2 + \frac{1}{\nu^2 C^2}} \qquad (2)$$

Qualitativ entspricht die Phasenverschiebung und R', welches kleiner als R ist, den Verhältnissen am Wismut außerhalb des Magnetfeldes; auch die Abhängigkeit von der Frequenz kann richtig dargestellt werden, wenn man geeignete Werte für r und C einführt.

Ist ein Rückstand dieser Schichten vorhanden, so wird er sich als energieverzehrendes Element geltend machen und die Widerstandsabnahme für Wechselstrom zum Teil aufheben.

Die Einwirkung hydrostatischen Druckes, der außerhalb des Magnetfeldes im wesentlichen den absoluten Betrag von ΔR und die Kapazitanz vergrößert, wäre dann so zu verstehen, daß der Druck, wie es die Nachwirkungsversuche nahelegen, wohl nicht als homogene Deformation wirkt, sondern auch die leitenden Metallschichten einander nähert und so die Kapazität der Kondensatoren erhöht. Sieht man von einer Rückstandbildung, welche die Kapazität bei größerer Frequenz kleiner erscheinen läßt, ab, so muß dann Druck eine ähnliche Wirkung ausüben wie Erhöhung der Frequenz, da in (1) und (2) überall das Produkt νC vorkommt.

Seidler hat dargelegt, wie im longitudinalen Feld durch die senkrecht zu Feld und Strom gerichtete elektromotorische Kraft eine erhöhte Wirksamkeit der geneigten Spaltflächen zustande käme.

Ist dagegen das Feld transversal, so wäre zu beachten, daß eine Wirkung auf die in Richtung der Drahtachse verlaufende Komponente des Stromes ausgeübt wird. Schichten, deren Ebene in Richtung der Drahtachse und des Feldes liegt, werden so Potentialdifferenzen und Aufladungen erfahren. Der beim Aufhören des primären Stromes zunächst senkrecht zur Drahtachse und zum Feld gerichtete Entladungsstrom wird wieder abgelenkt, und zwar in Richtung des primären. Das Verhalten eines solchen Kondensators wäre somit in gewissem Sinne ähnlich dem einer Selbstinduktion, indem bei Stromabfall ein Strom in Richtung des ursprünglich geflossenen zustande käme.

Bei schrägliegenden Spaltflächen würde sich dies nur auf eine Komponente beziehen.

Je nach der Neigung der Flächen und der Stärke des Feldes könnte dieser Effekt in einem kleineren oder größeren Teil der Kondensatoren auftreten, er hätte in höherem Maße einen inneren Ausgleich zur Folge, wodurch die Kapazitanzwirkung vermindert und der Wechselstromwiderstand vergrößert würde.

Sollte dies an dem Verhalten des Wismuts mitwirken, so wäre der Einfluß des Druckes, welcher das im Feld positive ΔR vergrößert und die Abnahme der Kapazitanz und das Auftreten der Induktanz begünstigt, vielleicht dadurch besonders ausgeprägt, daß gegen die Drahtachse wenig geneigte Schichten die Wirkung des Druckes in besonderem Maße erleiden, wie es die Struktur des Wismutdrahtes, in dem Kristalltrümmerchen einen inneren, kompakten Teil umgeben, nahelegt.

Eine Berechnung der Größen r und C in Formel (1) und (2) auf Grund des experimentell gefundenen Wechselstromwiderstands und der Phasenverschiebung scheint wenig Gewähr zu bieten, da die von Seidler entdeckten Nachwirkungen gewiß auch viel zur Gestaltung des Wechselstrom-Gleichstromeffekts beitragen. Insbesondere würde der Transversaleffekt in den starken Feldern, in denen er zur Geltung kommen

kann, an dem Auftreten der Induktanz des Wismutdrahtes beteiligt sein.

Die Berechnung würde C für die untersuchten Drähte zu einigen hundert M.F. ergeben.

Eine Beobachtung von Seidler, welcher fand, daß die als Nachwirkung auftretende elektromotorische Kraft ungeändert blieb, ob ein Kondensator von 0,3 oder 1,8 M.F. an die Drahtenden gelegt war, würde in Hinblick auf die von ihm betrachtete Polarisation auf eine ausgedehnte Wirksamkeit der Spaltflächen schließen lassen und so auch große Werte einer etwaigen Kapazität plausibel machen. Anderseits können diese Betrachtungen lediglich die Bedeutung eines Bildes oder einer formalen Darstellung beanspruchen, solange eine genauere Kenntnis der Struktur des Wismuts die Möglichkeit einer solchen Kondensatorwirkung der Spaltflächen nicht bestätigt hat.

Eine abschließende Behandlung der in Frage stehenden Erscheinungen scheint noch verfrüht: im Obigen sollte nur versucht werden, eine Auffassung des Wechselstrom-Gleichstromeffekts durchzuführen, welche sich auf die Annahme möglichst einfacher Struktureigentümlichkeiten aufbaut.

III. Zusammenfassung der experimentellen Resultate.

Die allgemeinen Ergebnisse der besprochenen Versuche lassen sich in folgenden Aussagen zusammenfassen:

I. Für die Einwirkung des Druckes auf den Gleichstromwiderstand des Wismutdrahtes im transversalen Magnetfeld wurde gefunden — wenn man sich auf die Mitteilung von Tatsachen beschränkt, die an sämtlichen genauer untersuchten Drähten von Hartmann u. Braun gleichmäßig beobachtet wurden — daß bis zu einem Druck von 600 Atm. und einer Feldstärke von 9200 Gauß eine Zunahme des Widerstandes durch allseitigen Druck eintritt, und zwar ist die durch einen bestimmten Druck hervorgebrachte verhältnismäßige, d. h. auf die Einheit des jeweiligen Widerstands bezogene Zunahme, (welche durch die Größe des Druckkoeffizienten ausgedrückt wird) im Magnetfeld größer als außerhalb. In einem Feld von 9000 Gauß ist der Druckkoeffizient um etwa 20 Proz. größer als ohne Feld; doch ist die Zunahme von Draht zu Draht

etwas verschieden. Bezieht man die durch einen bestimmten Druck hervorgebrachte Widerstandszunahme auf den Widerstand des Wismutdrahts außerhalb des Magnetfeldes, so bedeutet Obiges, daß diese Widerstandszunahme im Magnetfeld eine stärkere Vergrößerung erfährt als der Widerstand des Wismutdrahtes selbst. Für die Abhängigkeit des Druckkoeffizienten von der Feldstärke ließ sich keine allgemein gültige Beziehung aufstellen; annähernd nimmt er bis etwa 6000 Gauß der Feldstärke proportional zu und scheint für höhere Feldstärken beschleunigt zu wachsen.

II. Im Verlauf dieser auf die Bestimmung des Druckkoeffizienten gerichteten Versuche traten Nachwirkungserscheinungen auf, indem der Widerstand des ungedrückten Drahtes unmittelbar nach Ausübung eines Druckes größer gefunden wurde, als wenn der Draht längere Zeit nicht gedrückt worden war. Für diese Widerstandsänderung, die für die untersuchten Drähte bei den gewöhnlichen Versuchen der Größenordnung nach einige Tausendstel Ohm betrug, ergaben sich Abklingungskurven, welche einen ähnlichen Charakter zeigen wie die für elastische Nachwirkung geltenden.

III. Die Wechselstrom-Gleichstromversuche ergaben für die benutzten Frequenzen von 1700—3400 Per/Sek. eine Bestätigung der bekannten Abhängigkeit des Wechselstrom-Gleichstromeffektes sowohl hinsichtlich des verhältnismäßigen Unterschiedes des Wechselstrom- und Gleichstromwiderstandes $\Delta R = \frac{R_w - R_{gl}}{R_{gl}}$ als auch hinsichtlich der Phasenverschiebung von der Frequenz und der Stärke des transversalen Magnetfeldes. Speziell wurde bei den untersuchten Drähten gefunden, daß mit zunehmender Frequenz die Gleichheit von Wechselstrom- und Gleichstromwiderstand nach einer höheren Feldstärke hin verschoben wird.

IV. Was den Einfluß des Druckes auf die Größe ΔR anlangt, so wächst er mit der Frequenz und ist außerhalb des Feldes und in schwachen Feldern so klein, daß die Beobachtungen durch einzelne, auf Frequenzänderungen zurückzuführende Fehler stark getrübt werden. Beschränkt man sich auf die Messungen mit größerem Druck (500—600 Atm.), welche bei der Kleinheit der Einwirkung allein imstande sind, verläßliche Werte zu geben, so liefern die Messungen mit Draht Nr. 6, 4 u. 7

qualitativ übereinstimmende Resultate, welche zu einfachen Ergebnissen führen. Dieselben decken sich mit den bei Draht Nr. 5 gefundenen, wenn man drei Werte, deren Abweichung die Größe der möglichen Beobachtungsfehler nicht überschreitet, ausschließt. Die in dieser Art für sämtliche untersuchten Drähte als wahrscheinlich anzunehmenden Beziehungen lauten: Die Größe ΔR außerhalb des Magnetfeldes wird durch Druck absolut vergrößert; es wirkt hierbei der Druck ähnlich wie eine Vergrößerung der Frequenz. In stärkeren transversalen Magnetfeldern wird ΔR auch vergrößert, und es wirkt dabei der Druck wie eine Verstärkung des Feldes. Für eine solche Feldstärke, für welche ΔR sehr klein ist, ist die Einwirkung des Druckes auf ΔR nicht im selben Maße klein, sondern so gerichtet, daß ΔR unter Druck positiv größer als ohne Druck gefunden wird; eine ähnliche Wirkung würde die Verstärkung des Magnetfeldes haben.

V. Der Einfluß des Druckes auf die außerhalb des Feldes bestehende Phasenverschiebung des Wechselstroms geht dahin, sie zu vergrößern.

In schwachen Feldern von 2200—5500 Gauß ist die Einwirkung an der Grenze der Meßgenauigkeit; für die Frequenz 1700 Per/Sek. scheint bei einzelnen Drähten eine Vergrößerung der Phasenverschiebung durch Druck stattzufinden.

In stärkeren Feldern verkleinert der Druck die Voreilung des Stromes; dabei kann er unter Umständen die Richtung der Phasenverschiebung umkehren, d. h. den Wismutdraht mit einer Selbstinduktion behaftet erscheinen lassen in einem Feld, in welchem der nicht gedrückte Draht noch Kapazitanzwirkung zeigt. Auch hier würde eine Verstärkung des Feldes dieselbe Wirkung haben.

VI. Es konnte nicht entschieden werden, ob die Wirkung des Druckes auf die Größe ΔR und die Phasenverschiebung ihm proportional ist oder nach einem anderen Gesetz von ihm abhängt; es wurde aber im allgemeinen eine beständige Zunahme der Wirkung mit Erhöhung des Druckes zwischen 40 und 580 Atm. beobachtet. Bei der Anwendung eines kleinen Druckes von 40 und 100 Atm. war die Einwirkung so gering, daß sie nur im starken Magnetfeld die Größe der Beobachtungsfehler genügend überstieg, um deutlich bemerkt zu werden.

Die vorliegende Arbeit wurde im Physikalischen Institut der Universität München gemacht.

Der Verfasser möchte die Gelegenheit nicht unbenutzt lassen, dem Vorstand desselben, Sr. Exzellenz Herrn Geheimen Rat Prof. Dr. Röntgen für die Anregung dazu sowie für das dauernde Interesse und die wertvollen Ratschläge bei ihrer Durchführung seinen ergebensten Dank auszusprechen.

Lebenslauf.

Johannes Brentano, Sohn des Universitätsprofessors a. D. Franz Brentano, wurde am 27. Juni 1888 zu Wien geboren. Seine Mittelschulbildung genoß er in Florenz. Dort bestand er Oktober 1904 die Abschlußprüfung des Ginnasio Galileo und besuchte hierauf das Liceo Dante, das er Juni 1907, mit dem Reifezeugnis verließ.

Winter 1907—1908 bezog er die Universität München, wo er dem Studium der Physik, Mathematik, Chemie und Mineralogie oblag. Er besuchte an der Universität und an der Technischen Hochschule Vorlesungen und Praktika bei den Professoren und Dozenten v. Baeyer, Brunn, Burkhardt, Döhlemann, v. Dyck, Finsterwalder, Graetz, Groth, Koch, Laue, Lindemann, Pringsheim, Röntgen, Sommerfeld, Voß, Wagner, denen er für die ihm zuteil gewordene Ausbildung seinen ergebensten Dank ausspricht. Ab Sommer 1910 arbeitete er im Physikalischen Institut unter Leitung von Exz. Geheimen Rat Röntgen. Die vorliegende Arbeit wurde Anfang 1912 in Angriff genommen.